雙月刊

核能簡訊

NUCLEAR NEWSLETTER

NO. 176
2019 FEBRUARY

解人類的渴

將海水變淡水的核技術



核能簡訊 NUCLEAR NEWSLETTER
NO. 176
2019.02 雙月刊

編者的話

甫開春，我們還沉浸在送舊迎新的倒數歡樂聲中，但是空氣品質燈號的顏色已經刺眼得令人心驚，發現我們迎來的並不是一個更好的新年。

2018 年 11 月 24 日公投結果出爐，第 7 案「火力電廠每年發電量減 1%」、第 8 案「禁止新建燃煤電廠」，以及第 16 案「廢止電業法非核家園條款」等 3 案通過，未來將直接影響台灣的能源轉型步調。

全民公投結果竟實質反轉了政府既定的能源政策，這讓日本政界感到相當驚訝，日本山本幸三眾議員於今年 1 月 13 日來台，與「以核養綠」公投發起人之一的黃士修以及核能學會幾位參與公投的成員訪談，想深入瞭解其中轉折與關鍵，以及有什麼值得日本參考之處。

黃士修表示，2013 年創立「核能流言終結者」以來，傳達的是正確的核能資訊，吸引很多年輕人加入。2018 年 8 月 15 日台灣發生大停電，民眾擔憂廢核可能造成電力不足、電費上漲，以及燃煤火力發電造成 pm2.5 的空污問題，成為公投過關的重要因素；此外，年輕世代挺身而出擔任推動連署的志工，也是公投通過的重要助力。

山本眾議員則表示，日本並無空污問題，繼續使用核能的主要原因是能源安全及基載的需求。福島事故發生後，日本反核聲浪高漲，但顧及日本的未來，有提高能源自給率的必要，因此必須讓民眾瞭解基載電源的核能必須確保在 20% 以上。二、三十歲的年輕人有 80% 認為核電有必要，但因年輕人不去投票，沒有太大影響力。台灣原已決定 2025 核電歸零，但是全民投票的結果卻逆轉政策，年輕世代占了舉足輕重的地位，非常值得日本參考。未來希望能促進台、日年輕世代對於能源議題的交流合作。

台、日兩國對於使用核電各自的前提與背景雖然不同，但是期望能源自主、能源安全、供電穩定等卻是一致。我國能源轉型亟需積極、透明的資訊流通和社會對話，更需要充分的能源損益分析討論，並且提升民眾掌握能源基本資訊的程度，才能在能源轉型之路走得穩當順暢。

目 錄

出版單位：財團法人核能資訊中心
地　　址：新竹市光復路二段一〇一號
電　　話：（03）571-1808
傳　　真：（03）572-5461
網　　址：http://www.nicenter.org.tw
電子郵件：nicenter@nicenter.org.tw
發 行 人：朱鐵吉
編輯委員：李四海、汪曉康、陳條宗、郭瓊文、劉仁賢、謝牧謙（依筆畫順序）

主　　編：朱鐵吉
文　　編：鍾玉娟、翁明琪、林庭安
執　　編：長榮國際　文化事業本部
設計排版：長榮國際　文化事業本部
地　　址：台北市民生東路二段166號6樓
電　　話：02-2500-1175
製版印刷：長榮國際股份有限公司　印刷廠
行政院原子能委員會敬贈　廣告
台灣電力公司核能後端營運處敬贈　廣告

公投！為核而吵？

文 張瑋城

鑒於執政黨推行的「非核家園」政策可能造成嚴重的空氣汙染與生態衝擊，並且為了人民有不缺電、不限電與低電價的權利，以及社會大眾有選擇能源的權利，因此清華大學原子科學院李敏院長、核能流言終結者創辦人黃士修與中華民國醫學物理學會理事廖彥朋，共同發起「以核養綠公投」。此次公投困難重重，主要在於經費不足、人手短缺與外在干擾，在發起人鍥而不捨的努力下，各地認同此一理念的志工們各自出錢出力，並且在克服各種困難後，終於在 2018 年 11 月 24 日當天成功的在 54.83% 的投票率之下，以 5,895,560 張同意票通過此次公投。

在各地聯署至通過聯署門檻開始宣傳理念、尋求認同的過程中，許多民眾對此議題存有疑慮，以下僅整理出主要的疑惑與說明。

一、以核養綠公投內文為何沒提到綠能？

依照公民投票法第 9 條規定，一案以一事項為限 ，其中就曾為了確保廢除電業法後能重啟核電，被中選會以此原則刪除部分內容 ，網路上查一案一事項原則可知道過去幾件公投被腰斬的事蹟。

二、要如何養綠？錢從哪來？

養綠有 3 種理解：

1. 以中華民國法律而言核能不算綠能，綠能的定義有非常多種，總體來說脫離不

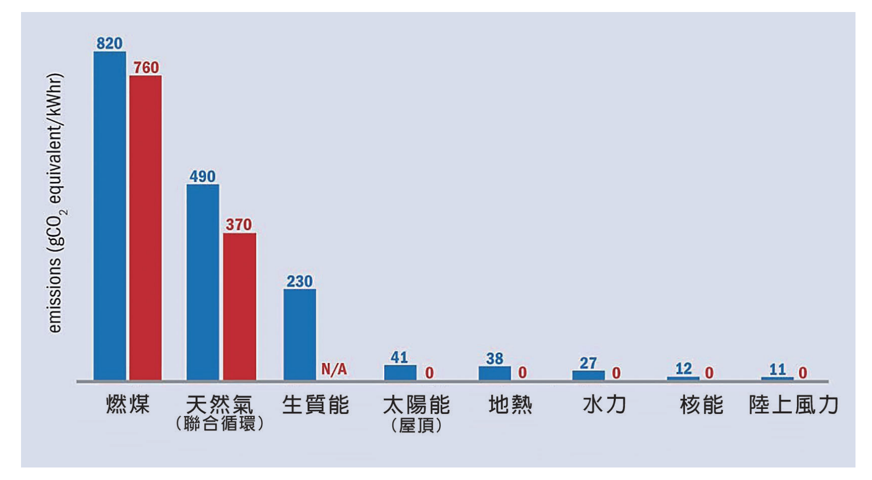


圖 1. 使用不同能源所製造的溫室氣體直接排放(紅色)與全生命週期排放(藍色)比較。生質能在燃燒時會產生大量的二氧化碳，雖然因此實質上也算碳基燃料，但在生長過程中也吸收了許多碳。在計算了包含採礦、萃取與濃縮對環境衝擊的影響後，核能發電的全生命週期釋放的溫室氣體與風力、太陽能發電相當接近，都遠遠低於石化燃料。(圖片來源：Physics World 2017)

了低環境衝擊、低溫室氣體排放。核能屬於低碳、乾淨能源是不爭的事實，若以上述的定義來判斷的話，核分裂雖不屬於再生能源卻也算是綠能的一種。

2. 綠 = 環境保護，透過讓核電廠繼續營運，達到減煤、環保、避免大規模開發生態保護區的效果。

3. 綠 = 再生能源，首先台電屬於國營事業，扣除法律規定的電業合理報酬後，剩下的盈餘皆屬全民利益，可供政府運用以提供綠能業者足夠的誘因、補助、研發經費等等；反之，當政府堅持關閉核電廠，卻使用電廠內的緊急柴油發電機，來應付夏天尖峰負載時，這種虧損其實也是由全民負擔。

三、養綠的錢從哪裡來？

核能發電每度電發電成本 (2018 年 10 月資料)1.23 元，已包含乾式貯存場、核後端除役費用、燃料成本、折舊及核子事故賠償金之保險金額等等。2017 年售電成本 2.5027 元 / 度、售電金額 2.5454 元 / 度，所以應該支持合理的改變能源配比、

表 1. 台電至 2018 年 10 月底止電價成本資料　（單位 : 元 / 度）

項目	105年審定決算		106年審定決算		107年10月底止	
	單價	%	單價	%	單價	%
1.燃料	1.2083	49	1.3790	55	1.5186	57
自發電燃料支出	0.9771	40	1.1383	45	1.2402	47
購電中燃料支出	0.2312	9	0.2407	10	0.2784	10
2.稅捐及規費	0.0372	2	0.0697	3	0.0478	2
稅捐	-0.0078	0	0.0192	1	0.0067	0
規費	0.0450	2	0.0505	2	0.0411	2
3.利息及折舊	0.5100	21	0.5070	20	0.4899	18
利息	0.0886	4	0.0878	3	0.0875	3
折舊	0.4214	17	0.4192	17	0.4024	15
4.運維費	0.7459	30	0.6072	24	0.6517	25
用人費	0.1683	7	0.1620	7	0.1659	6
維護費	0.0802	3	0.0866	3	0.0844	3
購電(非屬燃料支出)	0.3148	13	0.3070	12	0.3404	13
其他營業費用	0.1826	7	0.0516	2	0.0610	3
5.其他電業經營相關費用					0.0000	0
6.其他收入(減項)	-0.0598	-2	-0.0602	-2	-0.0567	-2
每度售電成本(A)	2.4416	100	2.5027	100	2.6513	100
每度平均電價(B)	2.6159		2.5454		2.6219	
每度售電稅前盈虧(B-A)	0.1743		0.0427		-0.0294	
稅前盈虧(億元)	388		223		-0.04	

註：

1.2015年度所得稅費用為負數主係因認列未實現之核四停工損失、公保超額年金成本等費用，因會計原則與稅法認列之時間性差異，致產生之所得稅利益，將於未來實現時始予認列所得稅費用。

2.2016年稅捐為負數主係因迴轉已提列備抵之虧損扣抵遞延所得稅資產所產生之所得稅利益所致。

3.依據經濟部2017年11月6日公告之公用售電業電價費率計算公式內涵及2018年第一次電價審議會核定每度平均電價之成本結構，增加「其他電業經營相關費用」項目。

調漲電價 (不應該因為選舉將近刻意暫緩調整電價) 等方式，讓我們國家有更多資源用在綠能發展，甚至其他如社會福利、教育等用途。

四、如果只有公投取消核能除役，那如何確保綠能可以發展？

這個問題以公投案內容來看，確實看不出來如何「確保」，只能希望政府在分配預算時能更謹慎，把錢花在刀口上；除此之外，台電本身也設有再生能源處，因此若能有合理的收益時，台電也更有資源可分配在再生能源的部門。

五、核一二三廠的運轉年限到什麼時候？如果不除役會不會超過年限？

不除役當然會超過年限，但這只是根據目前的審核辦法第 16 條規定，電廠延役必須在運轉執照到期前 5-15 年提出申請，所以核一、二廠的除役時間並不會因為公投法的通過與否改變。公投法通過除了代表人民認為現階段需要核能的意願外，修改審核辦法也並非立法院的層級，修改後則可以朝舊有電廠延役、核四廠啟封的目標前進，讓核能在安全的情況下發揮最大的利用價值，為人民的供電穩定奉獻。或許會有人質疑延役是否安全，其實原本設定 40 年的年限有很大的原因是反托拉斯，目前世界上也有許多電廠延役成功，並且還持續的運轉服務中。

六、要如何確保核能安全以及解決核廢料處理問題？

這是一個大哉問，要看安全的定義是甚麼，有的是主觀上的感受、有的是客觀的評估。核電廠的各種安全設施都是要避免「輻射外釋」與「爐心熔毀」，但爐心熔毀不一定會導致輻射外釋。核電廠內的安全設施設計原則秉持著「多重、多樣」，舉例來說，「多樣」指的是電廠內的冷卻水循環需要電力，因此當電廠急停時為了避免外部電力無法送進來，準備了柴油發電機、氣渦輪發電機、移動式發電機等。「多重」指的是一座核電廠有兩部機

表 2. 我國核子發電設施運轉年限

我國各核電廠停止運轉年限		
廠別	機組	有效運轉執照期間
核一廠	1 號機 2 號機	2018年 12 月 5 日 2019年 7 月 15 日
核二廠	1 號機 2 號機	2021年 12 月 27 日 2023年 3 月 14 日
核三廠	1 號機 2 號機	2024年 7 月 26 日 2025年 5 月 17 日

(資料來源 : 原子能委員會)

組，每部機組配備兩套柴油發電機(分開擺放)，並設置第 5 套可供兩部機組使用的柴油發電機。為了阻止輻射外釋有多重保護，包含燃料護套、燃料棒、反應爐壓力槽、圍阻體等等。原能會每年都會有緊急事故演習，並且採取許多被動式安全設施，例如生水池設置在山上，在需要的時候可運用重力注入冷卻水源。

「核廢料」是放射性廢棄物的俗稱，每一種發電方式都會產生廢棄物，火力為什麼現在會被討厭的原因，是煤炭中也含有重金屬，燃燒後這些重金屬也是輻射的來源之一。核廢料是唯一發電後能管理、處理的廢棄物，核廢料的處理也有很多種方法，處理方式分成低放射性廢棄物與高放射性廢棄物，以下分別敘述：

1. 低放廢棄物的來源包含醫、農、工、研與電廠內的防護衣等周邊用品，處理方式分成乾性廢棄物與濕性廢棄物，依其可燃(可燃物燃燒後經過加長曲折的煙囪，拉長輻射物質的衰變時間與周邊吸附物質的吸附效果)、可壓性質處理減容後、濕性廢棄物固化後進入乾貯階段，靜待其衰變(目前存放於蘭嶼及核能研究所)。即使非核家園之後，低放廢棄物仍會因為醫療等行為持續產生。

2. 高放射性廢棄物單指用過核燃料，依我國目前可能的處理方式為：自燃料池移出至用過燃料池持續冷卻(熱功率在移

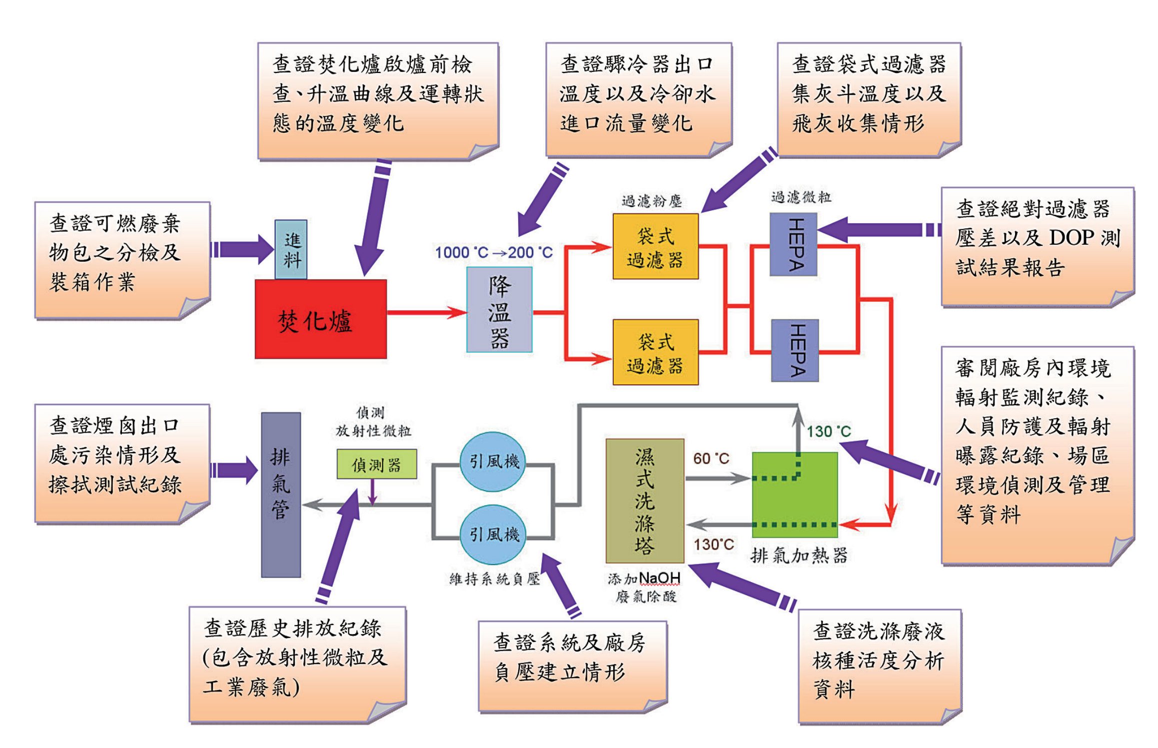


圖 2. 原子能委員會低放射性廢棄物焚化爐的安全管制重點示意圖

出時已降至原功率的 7% 以下，並隨時間持續降低)，約 5 年後可移出至乾式貯存場 (一般來說室外即可，我國則堅持室內)，並透過在鋼桶內封入惰性氣體避免反應之外，外圍的水泥護箱預留空氣通道，使自然對流帶走剩餘的衰變熱，放置 40 年之後 (目前希望能分階段核准，先核准 20 年) 再做最終處置。

最終處置的目的在於，期望後代能夠更好的利用這些資源 (現階段是廢料、未來可能不是)，且最終處置場此一方法在古代即有案例，曾有某地質層中發生過核分裂反應，但並未影響到生物圈。

國外對於高放廢棄物的處理方法則有再處理 (再提煉、重製)、快中子反應爐 (利用快中子碰撞鈾 238 產生鈽 239 再利用)，甚至還不算成熟的轉化 (將用過燃料中約 5% 真正的廢料，利用中子碰撞轉化成其他短半衰期的元素)。

七、2025 非核家園是否可行？

其實 2025 非核家園若是真的達成，在不考慮電價、物價的情況下，電力的調度也會是很大的問題。政府規劃的再生能源 20%，表示裝置容量遠高於 20%，且我國用電高峰在夏季，風場卻是在冬季最好；太陽能在中午達到高峰，遇到雲多、日落則無用武之地，並且難以預測。傳統發電中只有水力發電能夠快速的供電，以彌補再生能源突然的供電或不供電。當再生能源占比變大，水力發電無法提供此缺口時，表示其他火力發電必須暖機或 30-50% 負載，以隨時提供瞬間消逝的用電缺口，那麼這些能源是不是造成更大的浪費？參考國外的例子，我們在獨立電網的情況下，比德國更早的進入非核家園真的明智嗎？而且德國大力發展再生能源的情況下，其他傳統發電方式的裝置容量也並沒有因此減少！

(本文作者為清華大學核子工程研究所碩士生)

參考資料：
1. 公民投票法第九條 https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?PCode=D0020050
2. 聯合新聞網 以核養綠被打臉 https://udn.com/news/story/6656/3164395
3. How green is nuclear energy? http://live.iop-pp01.agh.sleek.net/2017/03/19/how-green-is-nuclear-energy/
4. 公用售電業電價費率計算公式 https://law.moea.gov.tw/LawContent.aspx?id=GL000344
5. 台電資訊揭露 電價成本 https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=196
6. 核能電廠運轉年限 https://ppt.cc/fWaE7x
7. 核子反應器設施運轉執照申請審核辦法 http://erss.aec.gov.tw/law/LawContent.aspx?id=FL032670
8. NRC Status of Initial License Renewal Applications and Industry Initiatives https://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/renewal/applications.html
9. Nuclear power in the United States https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_in_the_United_States#Plant_decommissioning
10. 低放射性廢棄物管制說明 https://www.aec.gov.tw/webpage/control/waste/files/index_02_1.pdf



加拿大乾式貯存設施

文 編輯室

加拿大現有 4 座核電廠、19 個商用反應爐及 2 個研究用反應爐在運轉中，另有皮克靈（Pickering）A 核電廠 1、2 號機處於安全貯存的除役狀態，堅特利（Gentilly）2 號核電廠則已決定除役，並處於永久停機到反應爐安全貯存的過渡階段。2016 年，核能供應了全加拿大 15% 的電力，水力占 59% 為最大宗，其他再生能源占 7%，燃煤只占 9%，安大略省已於 2014 年起逐漸淘汰燃煤發電。

2002 年由加拿大電力公司與加拿大原子能公司共同成立的加拿大放射性廢棄物管理機構（Nuclear Waste Management Organization, NWMO），主要職責為開發各種貯存及處置可行方案，並提供給政府做決定，以利後續處置作業。

當用過核燃料束從反應爐中取出時，需放置在裝滿水的冷卻池中，等待它們的溫度和放射性降低。至 7 到 10 年後，再將這些用過燃料束放入乾式貯存容器、貯存

窖或貯存倉中，等待再處理或最終處置。乾式貯存已經是一項經過驗證的技術，自 20 世紀 80 年代以來，一直在全球 23 個國家廣泛的使用。

加拿大所使用的是特有的 CANDU 型反應爐與核燃料，用過核燃料目前均暫貯於核電廠用過燃料冷卻池與乾式貯存設施中。截至 2017 年 6 月 30 日，加拿大有約 280 萬束用過核燃料束的庫存，這些用過核燃料如果堆疊起來，大約需 8 個曲棍球場可以容納。在加拿大現有反應爐運轉期限到期時，用過核燃料束總量預計約會有 520 萬束。

加拿大所有的用過核燃料都放在領有許可執照、安全管理的貯存設施內，有嚴格的安全防護措施，確保所貯存的用過燃料束不會造成公眾健康的威脅。用過核燃料的貯存是由廢料產生者—公用事業公司（即電力公司）與實驗室進行嚴密的監控，而安全管制與發照作業則由加拿大核子安全委員會（The Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC）負責，並與國際原子能總署（IAEA）直接合作。

加拿大安大略電力公司（Ontario Power Generation）在 1979 年曾對所屬核電廠用過核燃料貯存進行研究評估，當時提出廠內貯存與集中貯存兩種方案。該研究結果建議安大略電力公司採用廠內貯存策略，直到政府做出再處理或是直接處置的決定。研究結論認為電廠內有足夠空間，使用的冷卻水池可貯存至 2025 年。

目前加拿大用過核燃料乾式貯存所使用的裝載容器有 3 種基本設計：

- 加拿大原子能公司（AECL）混凝土罐
- 加拿大原子能公司的模組化氣冷式貯存系統（MACSTOR™）
- 安大略電力公司的乾式貯存容器

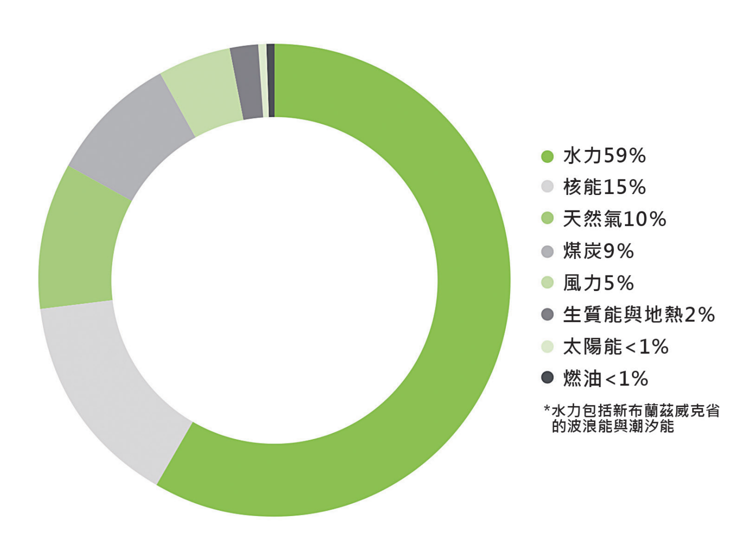


圖 1.2016 年加拿大電力來源占比 (來源 : CNA)

NWMO 表示，乾式貯存容器設計壽命的最低限值為 50 年，它們受到積極、嚴格的監控。研究顯示，經過長期持續的維護和檢查，這些容器可以安全使用更長的時間。50 年之後，還可以延長容器的使用壽命，或者可以再重新包裝用過核燃料。這些決定取決於許多因素，包括實施適應性階段管理（Adaptive Phased Management）的時間表。

加拿大的用過核燃料中期貯存設施分別位於安大略省、魁北克省和新布藍茲維克省的核子設施內，及加拿大原子能公司位於曼尼托巴省和安大略省喬克河（Chalk River）核子實驗室的場地（詳見表 1）。

80 年代初期，加拿大有一項用過核燃料延長貯存（Extended storage）數百年的研究，研究結論是採用地上混凝土

表 1. 加拿大的乾式貯存設施

編號	乾式貯存設施名稱	護箱型式	啓用年分	位置	備註
1	懷特雪爾實驗室	混凝土護箱	1977	曼尼托巴省	
2	布魯斯 A、B 核電廠	混凝土護箱	2002	安大略省	室內貯存
3	道格拉斯點廢棄物處理設施	混凝土護箱	1987	安大略省	
4	皮克靈 A、B 核電廠	混凝土護箱	1995	安大略省	室內貯存
5	達靈頓核電廠	混凝土護箱	2008	安大略省	室內貯存
6	NPD 用過核燃料貯存場（位於喬克河實驗室）	混凝土模組	1987	安大略省	
7	堅特利 1 號核電廠	混凝土護箱	1985	魁北克省	
	堅特利 2 號核電廠	混凝土模組	1995	魁北克省	
8	點樂波核電廠	混凝土護箱	1991	新布藍茲維省	靠近海邊

資料來源：原子能委員會 www.aec.gov.tw/webpage/dry/files/index_03_8-01.pdf



圖 2. 加拿大乾式貯存設施位置圖 (來源：NWMO)



圖 3. 加拿大放射性廢棄物處置設施與鈾礦分布圖 (來源 : CNSC)

容器貯存方式最具靈活性，能符合延長貯存的發展需求。這些研究促使安大略電力公司發展出乾式貯存容器（Dry Storage Containers, DSC）。目前乾式貯存容器已使用在皮克靈核電廠、布魯斯（Bruce）核電廠和達靈頓（Darlington）核電廠。

1995 年皮克靈核電廠第一階段乾式貯存開始運作，可容納 700 個 DSC 容量，2007 年第二階段再增加 800 個 DSC 容量。乾式貯存場將可容納皮克靈核電廠所有用過核燃料，直至最終處置。

布魯斯核電廠的乾貯設施可容納該廠所有用過核燃料，已於 2002 年運轉，而皮克靈頓核電廠的乾貯設施於 2008 年運轉。此外，加拿大原子能公司發展兩種乾式貯存的概念：模組化乾式貯存窖（CANSTOR）與混凝土護箱。這些概念都使用在魁北克水力（Quebec Hydro）電力公司和新布藍茲維克（New Brunswick）電力公司的廠內貯存。加拿大原子能公司在喬克河實驗室也有一座集中式乾式貯存設施，用以貯存早期反應爐（NRX、NRU）用過核燃料。

2007 年加拿大政府同意「適應性階段性管理」，以深地層最終處置做為用過核燃料解決方案，NWMO 於 2010 年 5 月開始進行最終處置場的選址工作，2012-2018 年進行可行性研究 (包含區域研究、詳細場址評估及候選場址社會民眾接受度)，2018 年啟動管制單位審查程序，其最終處置場預計於 2035 年正式營運。

加拿大決定採取深層地質處置方案之

前，曾對長期貯存的兩種貯存方案特點分析如下：

一、核電廠內延長貯存方案

NWMO 規劃在現有 5 處核電廠址及 2 處研究機構的 7 處貯存場址，開發新的貯存設施及場址內處理與運輸設備等。設施的位置可以放在地表或近地表，貯存方式可以採用貯存護箱（casks）、貯存窖（vaults）、貯存倉（silos）等不同的型式。

1. **貯存護箱**：貯存護箱是由混凝土與不銹鋼製造的耐久性可移動式貯存容器，是安大略電力公司所研發的乾式貯存容器，可填裝 4 個不銹鋼燃料模組，分別可存放 96 束 CANDU 型用過核燃料。貯存護箱滿載後總重量約 70 公噸，貯存護箱具有良好的屏蔽與導熱效果，貯存場將建造適當容量的廠房或混凝土壕溝，以便貯存護箱能妥善的排列存放。

2. **貯存窖**：貯存窖型式與目前在魁北克堅特利水力（Hydro Québec's Gentilly）公司乾貯設施所使用的相似，也是混凝土結構物。混凝土結構可提供抗輻射的屏蔽效果，並利用空氣自然循環的方式進行用過核燃料的冷卻。用過核燃料以每 60 束裝在一組不銹鋼燃料提籃（baskets）中，排列於貯存窖中進行長期貯存。

3. **貯存倉**：貯存倉設置於室外，為圓柱狀

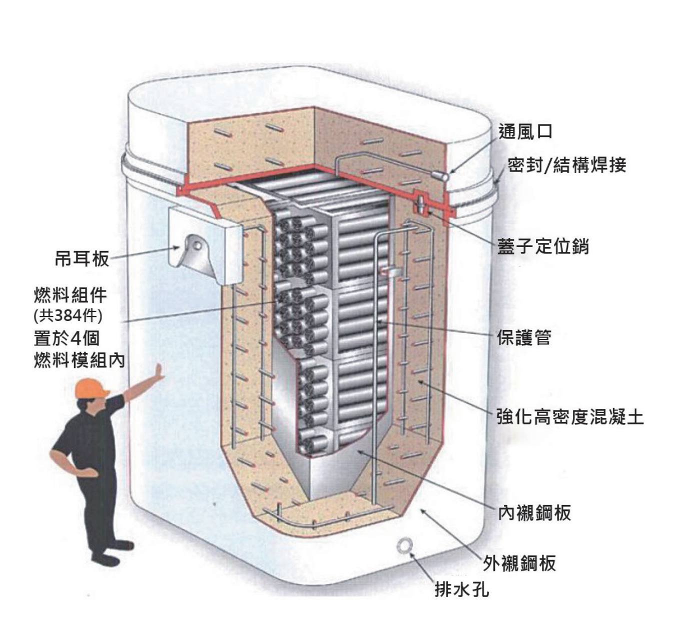


圖 4. 安大略電力公司研發的乾式貯存容器 (來源 : CNSC)

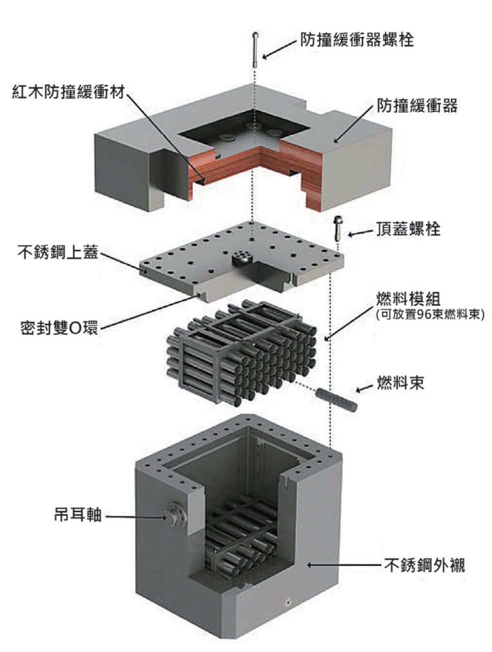


圖 5. 加拿大乾式貯存傳送護箱 (來源 : CNSC)



圖 6. 安大略電力公司乾式貯存設施 (來源 : CNSC)


圖 7. 達靈頓核電廠乾貯設施 (來源 : CNSC)


圖 8. 點樂波核電廠乾貯設施 (來源 : CNSC)


圖 9. 懷特雪爾實驗室混凝土容器貯存設施 (來源 : CNSC)

的混凝土加強結構物，以自然通風方式進行用過核燃料的冷卻。貯存倉內襯以環氧化物被覆的不銹鋼。可容納 9 組不銹鋼燃料提籃，每組有 60 束用過核燃料。這類型貯存倉與加拿大原子能公司目前所使用的類似。

二、集中式延長貯存方案

NWMO 對於新建集中式延長貯存的初步規劃，在現有 7 處貯存場址以外的地方，開發一處新的集中式貯存設施，及場址內處理廠房與場址外運輸設備等。集中式延長貯存設施牽涉到新設施的選址，以及用過核燃料運輸的問題，其優點為可將加拿大全國的用過核燃料集中管理。集中式延長貯存設施可容納加拿大全國約 360 萬束的用過核燃料，每年約可處理 12 萬束。集中式延長貯存設施的設計功能包括：

- 提供用過核燃料安全的防護環境。
- 對貯存的用過核燃料，進行監測與稽核。
- 有利於用過核燃料進行存放或回收的操作作業。
- 提供冷卻作用，避免用過核燃料或貯存系統溫度過高。
- 提供適當的輻射屏蔽，避免對作業人員或公眾造成危害。

根據 2014 年發表的「加拿大用過核燃料安全處置與管理國家報告」，在乾式貯存環境下，用過核燃料組件無論完整還是有破損，都可貯存長達 100 年，或是更長的時間，而不會失去輻射防護的完整性。

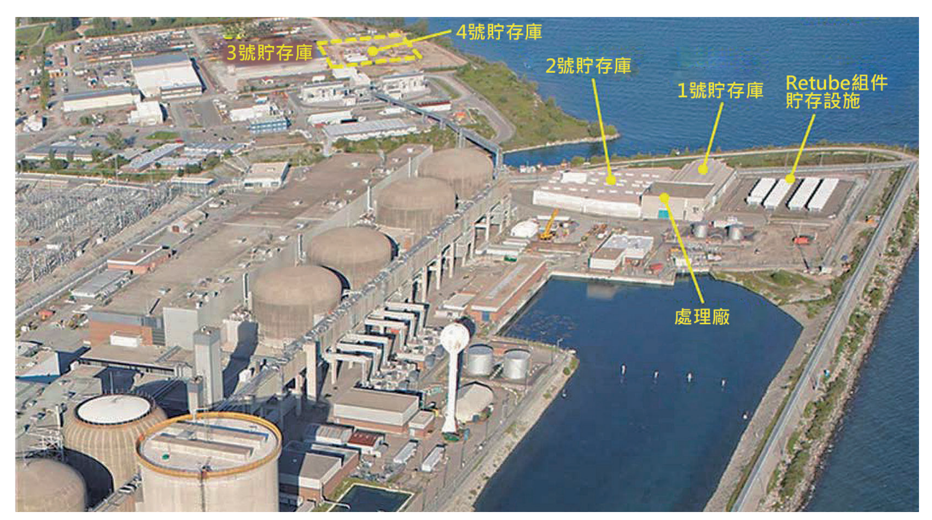


圖 10. 安大略電力公司皮克靈核電廠 PWMF 乾貯設施 (來源 : CNSC)

長期以來在乾式貯存設施中所獲得的經驗，加拿大對乾式貯存設施能安全運轉充滿信心，不會對工作人員和公眾帶來不必要的風險。自 1996 年以來，乾式貯存容器已在皮克靈核電廠廢棄物管理設施（PWMF）成功且安全地使用，安全性能在貯存期間都很優異，輻射劑量率低於監管的限值，集體職業輻射曝露低於預期，甚至還少 30%以上，加工區的排放量也低於監管水平的限值。安大略電力公司擁有的 3 個乾式貯存設施均無輻射污染，貯存容器也沒有排放污水。

為了設計和安全評估目的所進行的熱與屏蔽分析，在 PWMF 設施進行的分析與測量顯示，在乾式貯存中，用過核燃料外包層（cladding）的溫度不超過攝氏 175 度。而中子劑量率計算的結果符合預期，與加馬射線產生的輻射劑量相比，中子產生的輻射劑量率低微到可忽略不計。結果顯示因乾式貯存容器中的強化高密度混凝土在輻射屏蔽上發揮了功用。

參考資料 :
1. The Canadian Nuclear Factbook 2019, CNA
2. 加拿大核能發電現況摘要報告，趙衛武，2014 年 7 月 22 日
3. 用過核子燃料長期乾式貯存政策可行性研究，核能研究所，2010 年 11 月
4. 集中式放射性廢棄物貯存設施國際相關資訊，放射性物料管理局，105 年 3 月 22 日
5. NWMO, What Is Used Nuclear Fuel, 2016
6. Canadian National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) ,2014.10


圖 11. 堅特利 2 號核電廠乾貯設施，加拿大原子能公司研發的模組化乾式貯存窖 (來源 : CNSC)



日本核電廠除役最新進展

文 編輯室

目前國際間已有多座核電廠完成除役，日本在 2011 年 3 月 11 日發生福島事故前有 54 部商業用機組在運轉，除役與建造中的機組各 3 部，總共 60 部。但這些核電廠在福島事故發生後幾乎全數停擺，進行全面審查，截至 2018 年底，管制機構日本原子力規制委員會（NRA）僅核准 15 部機組可重啟，其中已有 9 部成功重啟商業運轉，剩下 6 部還在進行重啟準備作業。另外，還有 12 部機組的重啟計畫仍交由 NRA 審查當中，13 部機組未提交申請，另有 15 部機組決定除役（含普賢與文殊兩座非商業用反應爐），加上 2011 年發生福島事故的福島第一核電廠 6 部機組，目前確定除役（含除役中）的機組一共有 21 部。另外，東京電力公司也在 2018 年 6 月中，向福島縣政府告知打算關閉福島第二核電廠，但東電至今尚未作出任何正式的聲明，本文因此未將其列入除役機組。

日本核電廠除役申請與法規演變

根據日本管制法令，核電廠在開始除役作業前，必須向管制機構提出除役計畫，待除役計畫獲得准許後才可執行。除役計畫內容則需要包含下列要項：

1. 設施拆除的方法，包含對同座電廠內其他反應爐有可能造成的影響；

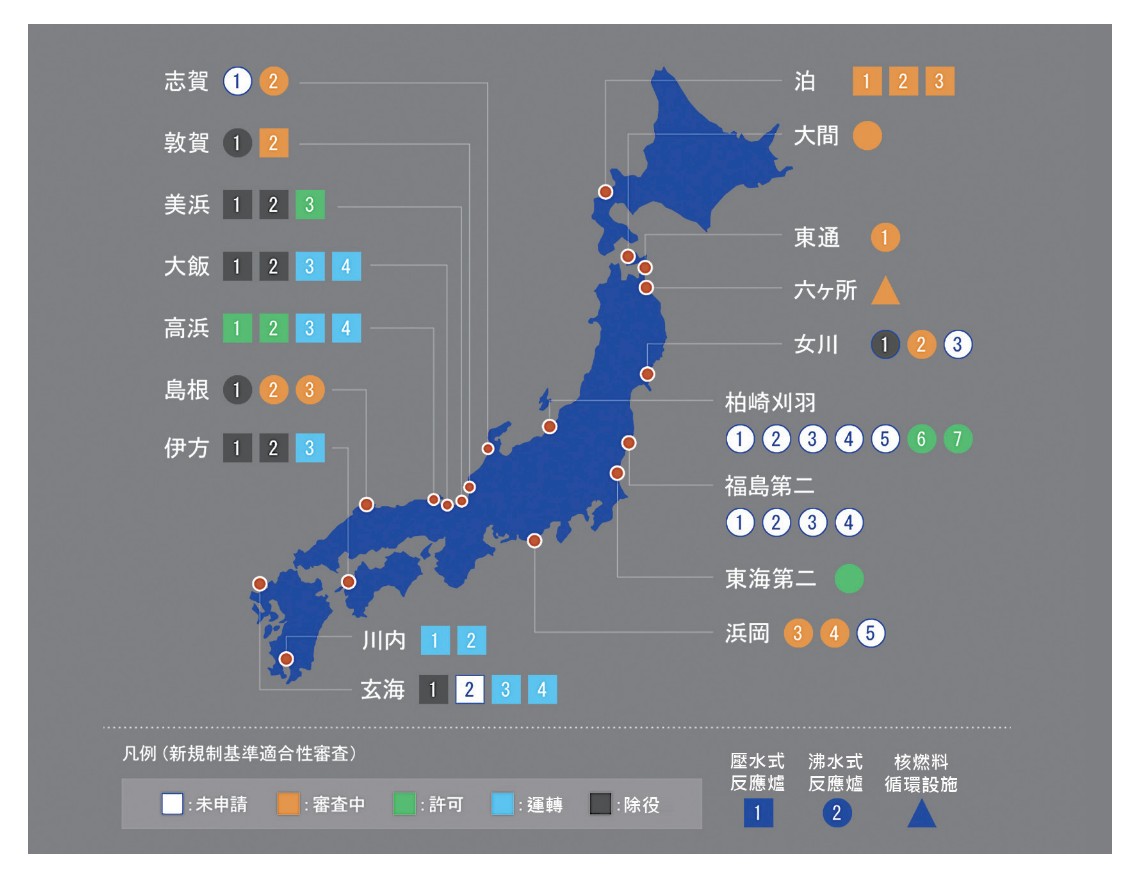


圖 1. 日本啟用新制核安基準後的核電廠運轉 / 除役分布圖 (截至 2018 年 12 月)，不包含除役作業進行中的東海第一核電廠 (單部機組)、浜岡 1-2 號、福島第一核電廠 1-6 部機組，以及非商用反應爐文殊與普賢。(圖片來源：日本電氣事業聯合會、日本原子力安全推進協會)

2. 核燃料的管理與移轉；
3. 受到核燃料污染區域的除污；
4. 放射性廢棄物的處置；
5. 除役程序；
6. 除役期間工作人員的輻射曝露管理；
7. 除役期間公眾輻射曝露的預估；
8. 意外事故以及事故可能對公眾帶來影響的預估；
9. 除役期間仍會維持的功能的管理；
10. 除役所需經費（金額）與財務計畫；
11. 除役期間的組織架構；
12. 除役期間的品質保證計畫。

而管制機構基於《商用核子反應器設置與運轉規定》所訂定的「除役計畫核准前提」，需確認電廠營運公司的除役計畫已符合以下條件才有可能給予批准：

1. 用過核燃料已從反應爐爐心中移出；
2. 核燃料應有合適的管理與移轉計畫；
3. 核燃料、放射性廢棄物應有合適的管理、處理與處置計畫；
4. 對核燃料、放射性物質與反應爐可能導致的災害應有適當的防護措施。

日本標準除役過程與各電廠除役現況

一般的核電廠在結束運轉後，會先將用過核燃料自反應爐中轉移至可暫時貯存處（如乾式貯存設施）或再處理廠，再進行廠內系統除污。而反應爐區域因為放射性程度較高，在除役期間必須先進入 5-10 年的「安全貯存」期，讓該區域的放射性自然衰減，藉此讓執行除役作業的工作人員所接收到的放射性劑量程度，能與運轉期間的運轉人員相同。雖然已將用過核燃料移出，但電廠設施內的配管、桶槽內仍有大量的放射性物質殘留，為使後期的廠房拆除工作順利進行，必須使用化學藥品來清理、去除配管及桶槽內的放射性物質，再依序拆除反應爐外圍設備、反應爐本體與外圍廠房，處理或處置建築拆除後所產生放射性廢棄物，待完成拆除、放射性程度降至一般後，進行地面復原、釋出場址供再次使用，此為一般核電廠的除役程序。

日本電力公司大多將一般核電廠的除役流程分成四個階段，分別是拆除準備（約

表 1. 日本核電廠營運與除役法規大事紀

時間	內容
1982-1996	日本首座示範用反應爐 JPDR 除役（建立除汙拆廠技術）
2001/12	日本首座商用核電機組（東海核電廠 1 號機）除役計畫
2005/12	反應爐管制法規修訂 - 建立除役管制法規架構 - 首次介紹放射性廢棄物外釋（Clearance）系統
2011/03	福島第一核電廠核子事故
2012/06	反應爐管制法規修訂 - 加強嚴重事故的管制規定 - 回溯系統 - 核電廠 40 年運轉期限（以及延役最長 20 年的可能性）
2012/09	成立管制機構：日本原子力規制委員會（NRA）
2013/07	新制法規執行 - 商業用核電廠必須通過新制安全法規的審查才可重啟商轉(在 2011 年 3 月時共有 54 部機組）
2016/01	國際原子能總署（IAEA）針對日本進行整體管制計畫的審查（Integrated Regulatory Review Service, IRRS）
2017/04	日本原子力規制委員會基於上述審查結果的建議，修改反應爐管制法規
2018/07	日本內閣通過第 5 次國家能源政策計畫 - 保留核能發電，維持與第 4 次時一樣的占比（20%-22%）

資料來源：日本原子力規制委員會（NRA）、日本原子力除役研究會（ANDES）

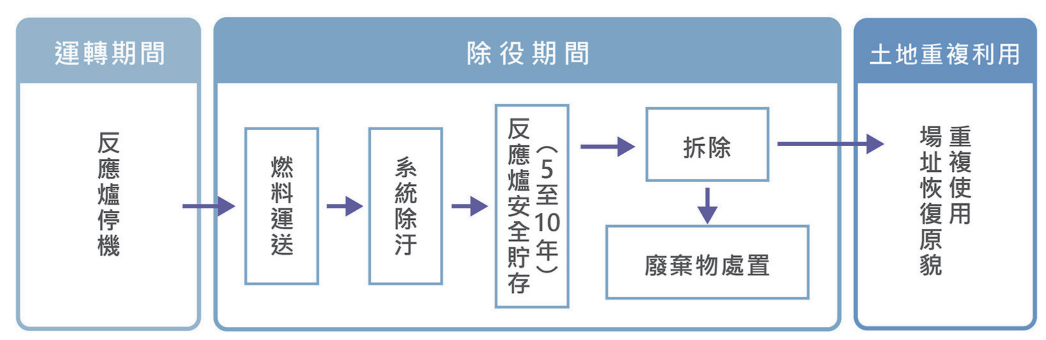


圖 2. 日本標準除役過程 (資料來源 : 日本原子力電力公司)

需要 5 年）、反應爐區域外圍設備拆除（約需要 10 年）、反應爐區域的拆除（約需要 5 年）以及廠房建築的拆除（約需要 5 年），總共需要 25 至 30 年的時間，但由於每部機組的情況不大相同，也有需要 40 年來進行除役的機組。

日本首座邁入除役階段的大型核子設施，是由當時的日本原子力研究所〔現為日本國立原子力研究開發機構（JAEA），如我國的核能研究所〕負責營運、管理的動力實驗用反應爐（JPDR），該座反應爐同時也扮演著日本除役技術的試驗角色。JPDR 的除役計畫主要分為兩個階段，自 1981 年開始的第一階段為相關技術的研發，1986 年開始拆解、移除反應爐，整個除役計畫至 1996 年結束。自那時開始，日本至今已有 21 座反應爐開始除役計畫。

根據日本原子力除役研究會（ANDES）的統計，這 21 部機組中僅有東海第一核電廠（單部機組）、普賢、浜岡 1-2 號共 4 部機組，在福島事故前就已決定除役。東海與普賢在 2006 年就已向原子力規制委員會提出除役申請，浜岡的兩部機組則是在 2009 年提出，目前都已獲准，正進行除役第二階段反應爐周邊設備的拆除。

在發生福島事故後，全球使用核能發電的國家都對自身的核安規範進行了檢視與檢討，日本在全面停止核電廠運轉後，於 2013 年 7 月啟用高標準的新制核能安全法規，電廠的設備需要符合新制標準才可以申請重啟運轉。日本各電力公司在評估後，相繼宣布將除役近 10 部屆齡 40 年、裝置容量較小的機組，因老舊機組若要達到新制核安標準耗資過甚，不符合經濟效益。

日本在福島事故後決定除役的核電機組，目前已累積到 17 部，其中文殊、敦賀 1 號、美浜 1-2 號、玄海 1 號、島根 1 號及伊方 1 號機組已獲得管制機構的批准。敦賀 1 號已經開始除役第二階段「拆除反應爐周邊設備」的工程，其餘的機組仍著手進行除役第一階段的拆除準備工作。已宣布會除役的大飯 1-2 號、伊方 2 號、女川 1 號機組則仍處於除役計畫申請的準備階段。

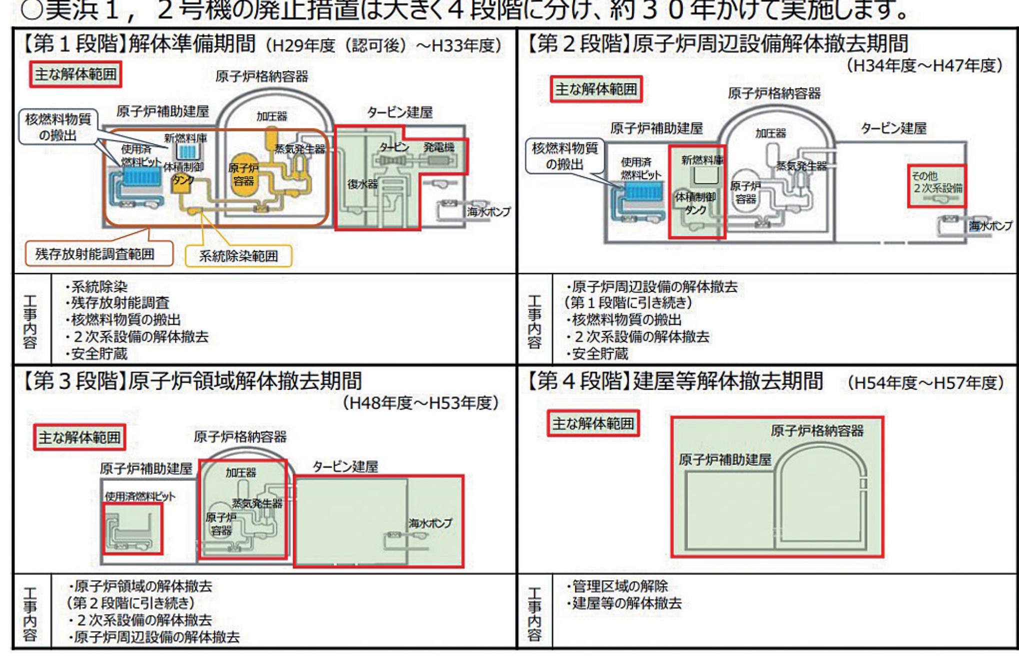


圖 3. 日本美浜核電廠 1、2 號機組拆除計畫，紅色區塊為每階段拆除範圍 (圖片來源 : 關西電力公司)

福島第一核電廠除役現況

2011 年受到 311 東日本大地震重創的福島第一核電廠 1-4 號機組，事故發生時因受到 15 米高的海嘯襲擊，該電廠所備有的電力全數喪失，導致冷卻水循環系統無法正常運轉。雖然該電廠全部的機組均在最初地震發生時即自動停機（4-6 號機當時原就處於停止運轉的狀態），但反應爐爐心內的核燃料仍需要冷卻系統正常運作，來防止反應爐發生無法控制的狀態。在冷卻系統無法運轉的情況下，福島第一核電廠的 6 部機組中，1-3 號機組出現爐心熔毀的情形，1、3、4 號機組也因為氫爆，導致反應爐建築頂部毀損，放射性物質遭到釋出。雖然福島第一核電廠所釋出的放射性物質以及反應爐受創的程度遠低於 1986 年的「車諾比事故」（因車諾比電廠的反應爐沒有圍阻體建築的保護），但 4 部機組同時發生嚴重事故的規模卻是史無前例，也成為日本現今最難、最複雜的除役計畫。

福島事故發生後，日本政府立即下令擬定福島第一核電廠 1-4 號機組的除役計畫，並於 2011 年 12 月底時公開，預計將耗時 30-40 年的時間。然而，因為國內反核聲浪過大，日本首相安倍晉三於 2013 年底決定，將只受到輕微損傷的 5、6 號機組也納入該除役計畫，東電也於隔年 1 月證明此事。經多次修訂後，福島第一核電廠 6 座機組的除役計畫於 2015 年 4 月底正式公布。

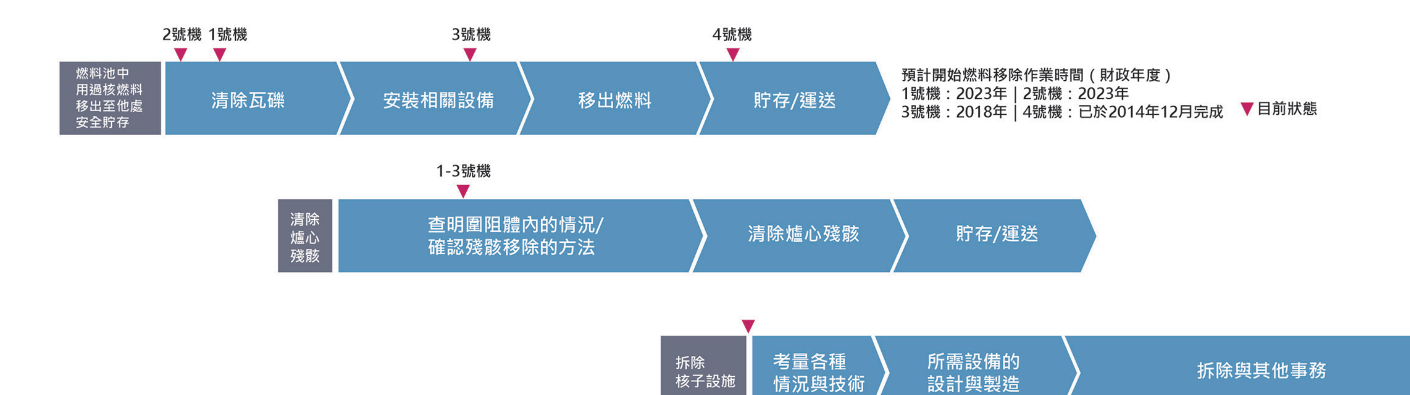


圖4. 福島第一核電廠1-4號機組除役現況與流程圖(圖片來源:日本經濟產業省)

1-4 號機組

受創程度最嚴重的福島第一核電廠1-3號機組，意外發生時均在運轉當中，雖然在地震發生後立即自動停機，緊急備用發電機也有即時啟動運轉，但伴隨而來的海嘯將電廠內所有備用電力來源切斷，冷卻系統也因此無法運轉，導致反應爐內部的溫度與壓力達到危險等級，爐心因此熔毀，甚至穿透反應爐槽底部。先後於1、3號機發生的氫爆，也造成這兩座反應爐廠房受到重創。建築物受損以及爆炸所產生的碎片、熔毀的燃料殘骸掉落至壓力槽底部，安裝在廠內用來移動核燃料的設備受損，甚至無法使用、前往爐心的路徑被堵住、大量的放射性汙水以及其他衍生的問題等，都反映了這3部機組除役的困難度。

福島第一核電廠1-4號機組的除役計畫分成3個階段，分別為：移出各機組用過核燃料儲存池內的用過核燃料、移除反應爐心內部熔毀的核燃料殘骸，以及拆除反應爐與所有建築物。目前僅4號機組完成第一階段將機組內用過核燃料池清空的工作，1-3號機因為損毀程度較嚴重，都尚未完成。其中1、2號機仍在清除機組內外的瓦礫，3號機則已於2017年初開始安裝移出用過核燃料所需要的外罩、起重



圖5. 福島第一核電廠3號機組已完成燃料轉移所需之外罩安裝(圖片來源:東京電力公司)

機等設備，已於 2018 年初完工，準備開始轉移燃料池內的用過核燃料。

至於 4 號機則因事故發生時剛好停機、處於替換燃料的階段，反應爐爐心內所有的用過核燃料，均已移至該部機組的用過核燃料池（爐心內沒有任何燃料）。但當時為了裝載新的核燃料，反應爐圍阻體的頂端為被移開的狀態，僅靠廠房屋頂作為與外界的保護，之後因為從 3 號機共用管線流竄過來的氫氣因而發生氫爆，導致廠房屋頂遭到炸毀。另一方面，用過核燃料池的溫度也在冷卻系統失常下飆升，根據國際原子能總署（IAEA）的報告，燃料池在發生氫爆前，最後一次記錄到的溫度是攝氏 84 度，當時美國核管會的主席 Gregory Jaczko，甚至懷疑燃料池內的水可能已燒乾。在燃料池儲有超過 1,500 束的核燃料、且輻射外洩的風險比其他部機組大的情況下，東京電力公司決定先從 4 號機開始清除燃料池，並於 2014 年底完工，成功安全的將一共 1,533 束的核燃料，自機組內用過核燃料池中移出，至福島第一核電廠內一座用過核燃料共同儲存池（獨立建築）與 6 號機的燃料池中進行安全貯存。

5-6 號機組

福島第一核電廠 5、6 號機組因為建造的時間較晚，安全系統的等級相對較高，離 1-4 號機也有一段距離。這兩部機組與 4 號機相同，於意外發生時也處於大修階段，反應爐並沒有在運轉，但為了準備重啟執行測試，核燃料已上載至爐心內。不過幸運的是，當 1-4 號機組處於喪失電力的狀態下，5-6 號機組周圍一座緊急備用

表 2. 福島第一核電廠 1-6 號機組一覽表

機組	1	2	3	4	5	6
種類	沸水式反應爐（BWR）					
淨裝置容量（萬瓩）	43.9	76	76	76	76	106.7
商轉日期（年/月份）	1971/03	1974/07	1976/03	1978/10	1978/04	1979/10
福島事故發生時之狀態	運轉中	運轉中	運轉中	因進行燃料替換而停機（爐心無核燃料）	因進行定期檢查而停機（爐心有核燃料）	因進行定期檢查而停機（爐心有核燃料）
福島事故毀損情況	爐心熔毀、氫爆	爐心熔毀	爐心熔毀、氫爆	氫爆	輕微損傷	輕微損傷
核燃料池內燃料束數量	392	615	566	1535（目前為0）	994	940

資料來源：國際原子能總署（IAEA）、美國核能運轉協會（INPO）

表 3. 日本除役中或準備除役之核電機組一覽表

除役狀態	機組數	核電廠/機組	反應爐型號	預計完成除役時間
除役作業進行中	6	東海第一核電廠 浜岡 1、2 號 敦賀 1 號* 普賢 文殊*	氣冷式反應爐 沸水式反應爐 沸水式反應爐 重水式反應爐 快滋生反應爐	2025 2036 2039 2033 2047
除役作業準備中（除役計畫已通過審查）	5	美浜 1、2 號* 玄海 1 號* 島根 1 號* 伊方 1 號*	壓水式反應爐 壓水式反應爐 沸水式反應爐 壓水式反應爐	2045 2043 2045 2056
除役計畫準備中（尚未提交申請但已宣布除役）	4	大飯 1、2 號* 伊方 2 號* 女川 1 號* 福島第二核電廠 1-4 號（未列入）*	壓水式反應爐 壓水式反應爐 沸水式反應爐 沸水式反應爐	尚未公布
特別事故機組	6	福島第一核電廠 1-6 號*	沸水式反應爐	約需要 30-40 年

* 福島事故後宣布除役的機組，福島第二核電廠則因為尚未作出任何正式的除役聲明，僅有向福島縣政府進行告知的動作，因此不列入。

資料來源：日本原子力除役研究會（ANDES）、行政院原子能委員會

發電機維持正常運轉，替這兩座機組的冷卻系統提供穩定電源，以致沒有發生失控的情形。這兩座機組也因為爐心並沒有受損，可用常規的方始來執行除役。

目前兩部機組爐心內的燃料都已轉移至機組內的燃料池進行安全貯存與管理，由於 1-4 號機組無法用正規方法進行除役，很多設備都需要依照實際情況來設計與改良，因此這兩部機組被用來進行遠端控制反應爐建築內除污、反應爐圍阻體內情況調查、移除燃料殘骸的裝置等的模擬試驗，這些工作均與多個研究機構與相關製造廠商一同進行合作與開發。

另外，電廠工作人員從需配戴全罩式面罩與防護衣進入電廠範圍，至今僅需在進入反應爐、渦輪機廠房等放射性劑量較高的建築（面積僅占整座電廠的 5%）前換上，在電廠其他室外區域只需穿戴一般工作服與口罩執行作業即可。目前該電廠內新建的辦公大樓內，就有超過 1,000 名專業技術人員從事除役相關作業。而在福島事故後電廠工作人員原本只能食用存於電廠內的存糧，至今也可在新建的休憩中心享用現煮熱食等，都是事故後至今的改變。

因除役產生的放射性廢棄物

根據日本原子能委員會的統計，除役一部反應爐所產生的放射性廢棄物數量，會因為反應爐機型而有差異。屬於高放射性廢棄物的用過核燃料不列入計算，拆除一座中等規模的沸水式反應爐（BWR），將產生約 220,000 噸的非放射性廢棄物，需要進行檢測、放射性活度符合規定的標準值才可解除管制、釋出且不需要作為放射性廢棄物處理的約有 10,000 噸，被列為低放射性廢棄物的則約有 7,500 噸，這其中只有 70 噸需要進行深層貯存，其他近 7,400 噸的低放射性廢棄物只需要在地面開挖的溝渠式（trench）或地下 10 公尺深的水泥窖式（pit）貯存設施中進行長期儲存即可。

至於除役一座中等規模的壓水式反應爐（PWR），會產生較少量的低放射性廢棄物，約 4,000 噸以下，其中需要進行深層貯存的則約有 200 噸。非放射性廢棄物與不需要列入放射性廢棄物的數量，都比沸水式反應爐的稍微少了一些，分別為 215,000 噸與 8,000 噸。

結語

核電廠除役計畫以拆除反應爐本體、附屬設備與建築物，並恢復土地原貌為原則，是相當複雜、耗時的工程，整個作業的難度與複雜性不亞於原電廠的興建，需要考量到的因素涉及政策、安全、技術、環保、經濟以及公眾共識等層面，加上各因素間也相互影響，必須事先做好完整、妥善的規劃。日本因為福島事故而執行最高標準的新制核能安全法規，除了在福島事故前就已開始除役作業的浜岡與東海核電廠之外，已有 16 部商用反應爐因無法達到新制法規的標準決定除役，但目前仍有 10 部尚未做出要申請重啟或是除役的決定，除役的數量在近期內還有可能再度往上攀升。

資料來源：

1. Nuclear Regulation Authority, Japan. (2017, June 30.) "Regulatory Framework for Decommissioning of Nuclear Power Plants in Japan."
2. The Association for Nuclear Decommissioning Study. (2018, September 11.) "Current Status of Nuclear Power Plant Decommissioning and Amendment to the Relevant Regulations in Japan."
3. Japan Atomic Power Company. (2015, April.) "Decommissioning situation of Nuclear Power Plant in Japan."
4. Kansai Electric Power Company. (2018, July.) "Kansai Electric Power Group Report 2018 CSR & Financial Report."
5. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (2018, February 21.) "Installation of all Dome Roof Segments for Unit 3 Spent Fuel Removal Completed."
6. Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry. (2018, March.) "Important Stories on Decommissioning 2018."
7. Institute of Nuclear Power Operation. (2011, November.) "Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station."
8. 日本原子力政策担当室，《「原子力利用に関する基本的考え方」に盛り込むべき事項（5）～補足説明資料～》
9. 行政院原子能委員會，《赴日參加 ANDES 除役訓練課程與參訪浜岡核電廠》
10. 財團法人核能資訊中心，《核能簡訊 162 期：日本核電廠除役現況》

來自國際環保英雄的觀點

文 張文杰

2018 年 11 月台灣來了一位很特別的國際環保人士—麥可・謝倫伯格（圖 1），用「特別」來介紹是因為他曾經反對核能；因為小時候害怕核武，長大後當他深入瞭解核能，才發現自己過去對核能的誤解有多深，最終轉為擁核人士，並曾在 TED Talks 發表《恐核如何對環境造成傷害》演講。後來他成為氣候政策專家，關注氣候變遷的問題，並成立了環境保護組織 Environmental Progress，探討全球能源與環境關係，曾被《時代》雜誌評選為「環保英雄」。

謝倫伯格這次來台是因為台灣正要舉行「以核養綠」公投，謝倫伯格希望可以將國際最新的能源與環境資訊帶來台灣，當民眾擁有越多資訊，就越可以做出正確的判斷。謝倫伯格來台後先跟各地的公投志工、環保團體與反對核能的民眾交流，實際瞭解並體會台灣的情況。接著於 11 月 19 日上午出席記者會，與國內外的核能專家交流，並說明為何他認為「核能可以拯救人命」。

謝倫伯格演講的投影片（圖 2）就直接點出主題，世界衛生組織的報告指出，全世界每年有 700 萬人死於空氣汙染，死於發電事故的人數和死於空氣汙染的人數相



圖 1. 謝倫伯格 (左) 與反對核能的民眾合照 (圖片來源 : 謝倫伯格臉書)

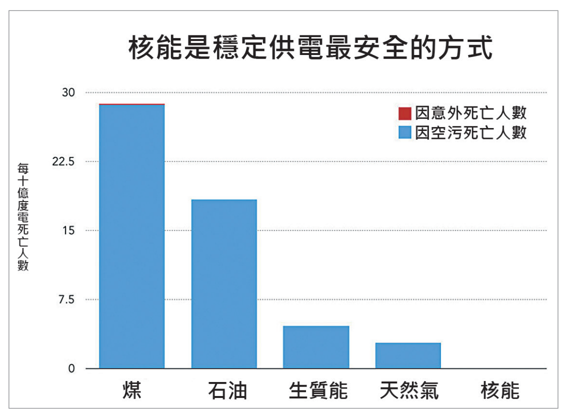


圖 2. 各種穩定供電來源與每單位所造成死亡人數

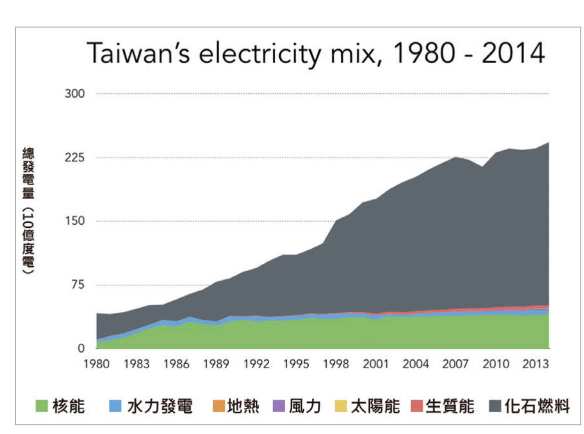


圖 3. 台灣 1980 年到 2014 年的各種電力來源

比，根本是九牛一毛，核能是穩定電力中最安全的發電方法，因為核能不會製造空氣汙染，可說使用核能就是在拯救生命。

接著謝倫伯格說：「台灣幾乎沒有自產化石燃料」，即使不擔心化石燃料對氣候變遷與環境的影響，台灣有近 97% 的能源都要依賴進口（圖 3），若是使用核能的話，台灣就能夠大幅減少對進口化石燃料的依賴，也能省下大筆進口液化天然氣以及燃煤的錢。而且過度依賴進口液化天然氣，將會危及國家能源安全。

台灣的核能加上再生能源的比例曾經高達 6 成以上，但是隨著核能發展停滯、用電量增加、再生能源技術尚未突破，近 10 年的化石燃料比例都接近 8 成（圖 4）。

接著謝倫伯格談到，他在台灣參觀了浮在湖面上的太陽能板，當地的環保人士（圖 5）秀出手機的番鴨圖片對謝倫伯格說：「自從湖面上裝了太陽能板後，原本常出

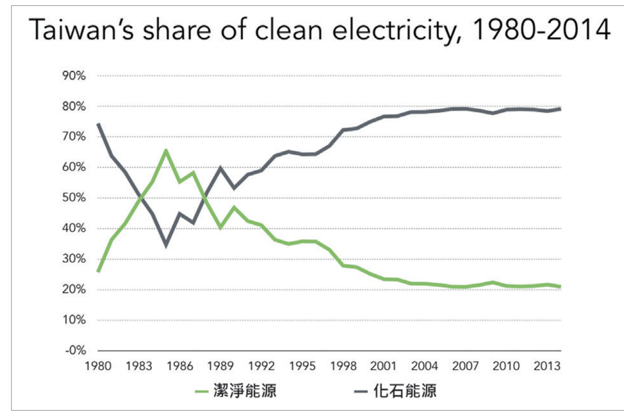


圖 4. 台灣 1980 年到 2014 年潔淨能源的比例


圖 5. 在地的環保人士與手機裡的番鴨照片





圖 6. 太陽能發電所需要的土地面積是核能的 1,000 倍以上

現在這座湖的在地番鴨幾乎都不見了。」因為在安裝太陽能板和相關設備（如電纜）的工程中，對當地動物造成不小的干擾，安裝之後，當地生態也跟之前不一樣了。當謝倫伯格問起這些番鴨去哪裡了？他說他也不知道，但這些他從小看到大的番鴨，在這裡已經看不到了。

圖 6 左邊是謝倫伯格的助理與核四廠合照，謝倫伯格表示相同的發電量，太陽能所需要的土地面積是一座核電廠的 1,000 倍以上，像台灣這樣設置在湖面上（圖 6 右邊），還有許多管線跟陸上輸配電系統連結，對湖泊和當地生態都會造成影響。

使用再生能源的初衷是低碳、無空污並對環境友善，但現在有些國家只顧衝高再生能源的裝置容量，卻忘記了對環境友善這件事。例如美國的加州預計在 2050 年要全部使用潔淨能源，雖然潔淨能源定義中有包含核電，但加州不打算蓋新的核電廠，因此規劃要在大片土地上裝置非常壯觀的太陽能板陣列。但台灣的土地資源非常寶貴，可以使用核能來節省土地資源。

核能除了燃料體積最小、最少，所需的建築材料也是最少的（圖 7）。因為開採水泥、混凝土、玻璃、鐵等材料，都會破壞環境，所以我們應該選擇所需建築材料

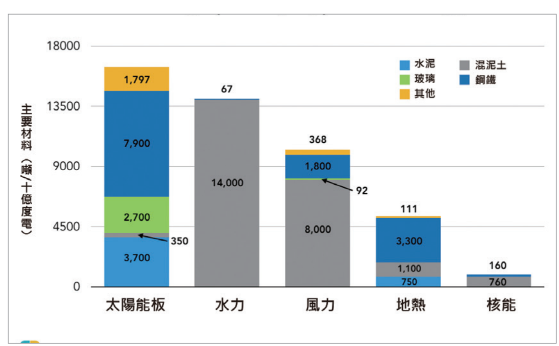


圖 7. 各種能源產生 10 億度電所需的建築材料

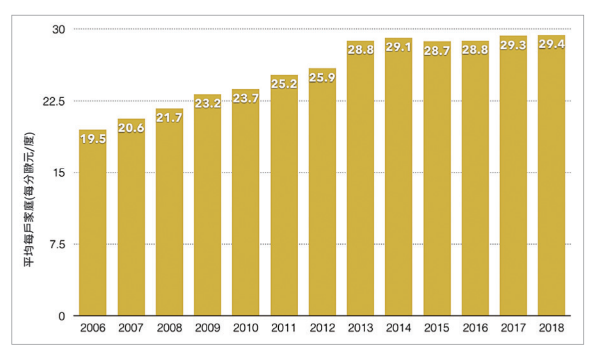


圖 8. 德國 2006 年到 2018 年的電費上漲 51%

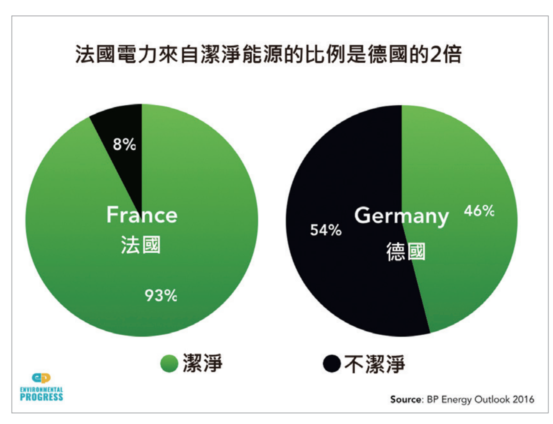



圖 9. 德國和法國的潔淨能源比例比較圖

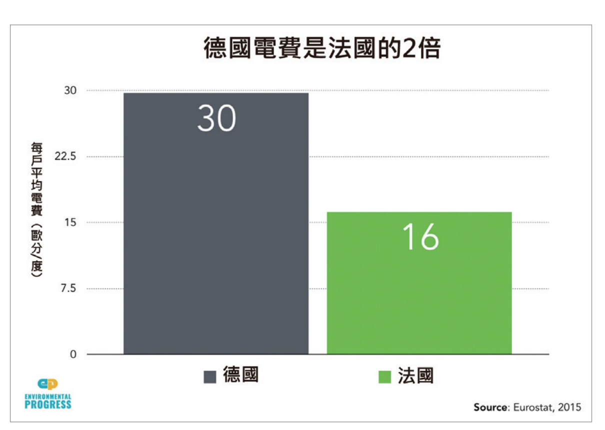


圖 10. 德國和法國的電費相比圖

最少、對環境影響最小的發電方式。

謝倫伯格接著談到核廢料的話題，他認為核廢料其實是核能最大的優點之一，因為核廢料的體積非常小，現在的技術可以將核廢料與輻射和外界阻隔。瑞士的土地大小和台灣差不多，核能占比也差不多，而瑞士 45 年來所製造的核廢料只需要一個體育館大小的建築物就可以裝下，而且沒有任何輻射排放到環境中。謝倫伯格表示：「我不懂為什麼每個人都這麼擔心核廢料？明明其他發電方式的廢料更難處理、對環境的影響更嚴重。」

謝倫伯格聽說台灣反對核能者很喜歡以德國作範例，他表示德國 2006 年到 2018 年的電費增加了 51%（圖 8），很多人以為多花一點錢可以抑止氣候變遷，但那不是事實，法國的潔淨能源占比是德國的 2 倍（圖 9），可是電費只要德國的一半（圖 10），因為他們大量使用核能發電。如果德國當初把花在再生能源的 5,800 億美元投入核能發電，德國早已達成 100% 潔淨零排放的目標。所以台灣若要學習德國必須慎思，因為那並不是最好的做法。

核電便宜的原因之一是因為它很穩定，一年當中有 8 成到 9 成的時間都可以發電，無論白天黑夜、有風無風；而不穩定的電力來源需要很高的額外成本，這是反對核能者在討論成本時常常忽視的部分。

最後謝倫伯格說：「人們相信很多關於核能的誇張流言，而那些都不是事實，例如綠色和平組織及其他人，宣稱有 100 萬人在核災中死亡，這等同於不相信世界衛生組織、聯合國等，數百位世界上頂尖公衛專家說的事實。我們只要花一點時間去瞭解，就可以知道核能是最安全的能源。對於像台灣這麼小的國家，核能更是特別的重要，一般民眾絕不能因為不瞭解而迷信與恐懼，使得這些珍貴的事物變得脆弱不堪。」

（本文作者為核能科技協進會主任，
圖表來源：Environmental Progress）

核四輓歌

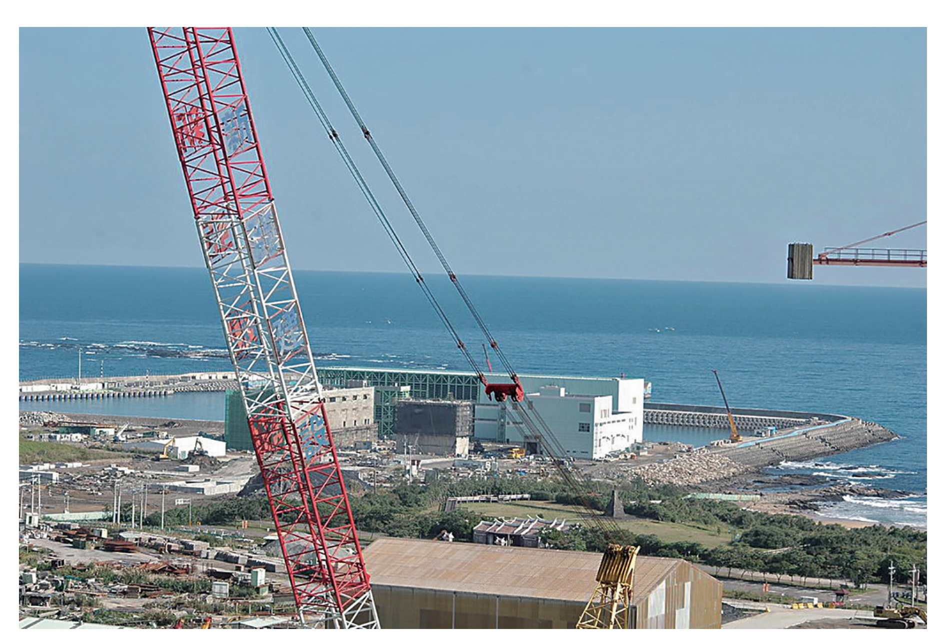
文 劉克敵

儘管兩批燃料棒已被悄運出境，幾乎等於判了你的安樂死刑，我仍然要寫這一篇輓歌，為你送行，祈禱。這是從台北市的一家廟堂要來的一炷香，現在將它點著，借一縷輕煙，與你溝通。我不敢說這是祭奠你，也許上天有眼，還有一線起死回生的希望。幾十年來，你受太多的委屈、折磨、災難，你都默默地忍受著。你就是這一炷香，虔誠地燃燒著自己，一星星小火紅，短促的隱隱地完了。

我和你相識是從民國 82 年的那次夜探開始的。地點是貢寮地區的鹽寮，我把你看為有靈性的巨人，而不只是一處山川，你是台灣電力公司排行老四的兒子，是眾望所歸，全民寄望的後起之秀。

容我把那次來鹽寮拜訪你的經過，從頭說起吧！

那年，我剛從中國技術服務社工業污染防制服務團卸職在家，得悉鹽寮村爆發了震撼台灣的激烈抗爭事件，是反對者糾合群眾，阻止興建核四廠而引起的。剛獲得環保文學獎榮譽的我，哪能無動於衷？本乎好奇與求知、智識的責任、未完成的使命感，便自告奮勇地前去拜訪，藉此瞭解盤旋在腦海中的實情實景。以下是我的真



龍門電廠重件碼頭及防波堤工程



實報導：

7 月初的晚上，我從南港火車站搭乘台鐵唯一的一班夜車出發。當晚到達貢寮車站，一出站就是黑沉沉的山區，有一條隱約可辨的步行小徑，沒有路燈，也沒有別的行人，只靠天空中的星光勉強辨認路況。在這樣的峽谷中走了約 2 小時，天空才出現微曦，可以逐漸看出山間的景物，又聽得此起彼落的山鳥聲，打破了可怕的寂靜。移時，又聞得一陣撲鼻的花香，原來是道路兩旁盛開的野薑花所散發出來的芳香。且賞且走，來到一處小坡，站上去探望，見有一條小河，從遠處蜿蜒而來，形成一個小水塘，看標示名叫雙溪河。

前有一條名叫新社的大橋，我乘興過橋到對岸，迎面的是繁茂的松、竹和結實的菓樹，也有幾間茅舍型農家，散落在林野間。這時，村民尚在睡夢中。我倒是時聞雞鳴和犬吠聲，好一個清幽之晨也！我在此盤桓約半小時，回頭過橋繼續上路，終於走完這條峽谷，來到與濱海公路的交錯處。這時，天色已亮，我站在海濱，以開朗的心情欣賞晨光。

回味剛經過的情境，深感這一帶充滿山水清音的景致，實在是尋幽攬勝的好去處，大有發展觀光的潛力。如果把這些自然景觀再加以人工的改造，更可增色不少，比如在雙溪河沿岸種植梅、桃、柳，春天到來時，來此欣賞梅、桃、柳爭春的景致，該是多麼富有詩情畫意的享受。

「山不在高，有仙則名。」那麼何不在山上，建一座廟，聘請一位高僧，來此住持弘法。如此，必可吸引更多人來此參拜，想想看，到時候如果有人駕一葉扁舟，沿河而來，在晴朗之夜，賞月上東山，聽江樓鐘鼓，是何等高雅享受。果爾，這處原來不起眼的山區，說不定就會脫胎換骨地繁榮起來了。

欣賞一陣子後，天更大亮，乃繼續前行探路，但不知應朝那個方向，明知工地可能就在附近，怎麼毫無一項可資識別之物？又不見有人在此附近出現。我自行決定，選擇北行，走了幾十步，終於見到有一塊標示的牌子，原來要探訪之地就在這裡了。我穿過一道鐵絲網後，登上一小土堆，見前面雜草叢生，似有人走過的痕跡，地下有幾個小洞。我在附近找到一根枯木，一方面用作撥草尋路，一方面打草驚蛇。就這樣小心地舉步，途中又經過幾方土堆，最後，來到一處已乾涸的小溪岸，

原以為很容易通過。那知一腳踩下去，腿很快就下陷了。糟糕！原來是流沙河！我俯下上身，以避免垂直的加重下沉。努力了幾次，才脫身而起。

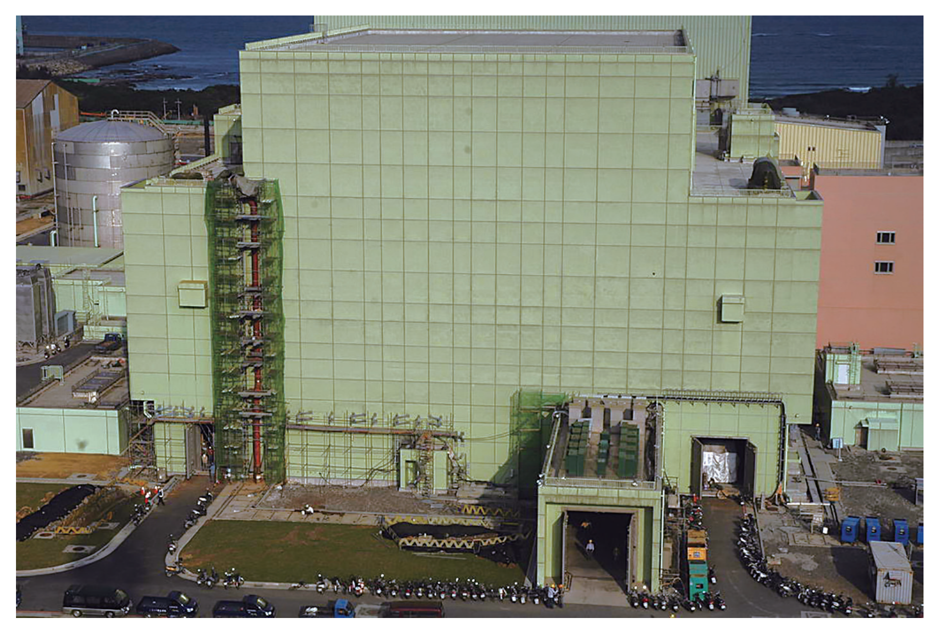
上岸後，先把身上的流沙刮去，然後向前走，終於，有一條較好的便道，不錯，這兒才是進入施工現場了。只見路旁散落了挖土機、推土機，和其他施工用的機具，還有塑膠管及廢土堆等，地上有幾處插有小旗和標竿。至於已完成的工程，是一處已挖得很深的一座大水池。除此之外，也就乏善可陳了。這樣的場景，內行人一看，就知道當時一定是被迫停工，倉皇留置遺棄的。還有，像這樣關係重大的建設，怎麼會變成這樣的下場？不由得我一陣痛心，流下淚來。隨即想到，是不久前，建廠預算被凍結才無法繼續施工，是「非核家園」阻止了繼續興建。

既然無法繼續施工，工作人員也就樂得省力，回家去也，無怪乎沒有看到留守人員。但這樣重要的建設工程，總該有一個像樣的施工辦事處吧？啊，有了！在前方較遠處，有一間比較大的木屋，應該就是吧？姑且前去看看。於是步行約 300 公尺，終於來到那間屋子，這才看出是一座 2 層的樓房。我沿梯而上到頂層，見室內只有一張桌子，一張椅子，未見有任何施工圖表，或其他文件，我只好站在樓頂，四方觀望。當時的立即感受是，選擇這個地方作廠址是非常高明的決定。這裡三面環山，境內人煙極少，地區隔離，安全維護上有先天的優點。據我所知，這是經過國際原子能總署所圈選的。台電選定這作為你的新居，是你老四的福份，也是全民的美意。這樣好的家屋，誰會將它棄毀？

從樓上下來後，時已近中午，我本打算



龍門 1 號機



龍門 2 號機
反應爐廠房

拜訪到此結束回台北了。但想到來此不易，還想多發掘一點。猛抬頭，見遠在後山坡上，有一座亮麗的鐵塔，而且有比較好的通道直達，於是我毫不考慮地走去，約半小時的山路才到達。看標示，原來是台電公司電源勘測隊興建的高達 30 公尺的瞭望塔。我吃力地登上塔頂，放眼四顧，這真是以篳路藍縷的精神，高瞻遠矚的眼光所選得的最佳福地。

我終於下塔，向你揮手告別，結束這次不平凡的訪問。

20 年來，記不清有多少的抗爭事件，在各種場合上演著，視核四為洪水猛獸，猶如眼中釘，必欲趕盡殺絕而後快。反對者要「非核家園」不要「不安全的核電」，利用「台灣民眾向來以日本為師，認為自己處處不如日本。以為日本的核能運轉績效比台灣強，從而認為以嚴謹著稱的日本都會發生那麼嚴重的福島核災事件，何況是台灣？」的論調，以假設性的推論，為那一波反對核四運轉的浪頭，推波助瀾。

對於這種論調，核安管制單位曾一再地作了懇切的解釋，強調台灣絕不會發生福島那種核災的理由：(一)我國與福島一廠防海嘯設計及重要設備不同。(二)我國核電廠獨有的「斷然處置措施」。但不管以怎樣的例證作舌焦唇敝的說明，反對者都因種種負面的心態置之不理，就這樣決定了你的命運。

不過，老四啊，我不願青史盡成灰，不信真理喚不回！

事實很顯然：台電的 3 座核電廠都很爭氣，在 30 年的運轉中，從未發生任何核子災害，對台灣能源的貢獻，已提供

了 2/5 的電力。這對於發展國家經濟及提昇人民生活素質，作了卓越的貢獻，已是不爭的事實。做家長的看到自己的 3 個兒子，長年辛勞無怨無悔地貢獻，自然十分欣慰。只因考慮到運轉多年，應該稍息塵勞，於是為了3兄弟的除役問題預作安排。另外，鑑於全球氣候的暖化跡象，未來能源的減碳功能是天大考驗，以及發展經濟的前瞻性，核能發電絕不可缺少。本乎事實需要，別無選擇，所以才以高瞻遠矚的情懷，在這兒興建一座更進步的核四廠，但卻遭到反對者的毀滅性抗爭。為了寧人息事，政府以極大的耐心，決定封存而不運轉，這已是仁至義盡的讓步。「穩健減核」、「節能減碳」兩大政策，是唯一的出路。總之，要減少二氧化碳，核能為不可缺少的能源，要停止興建，是不正確的。根據《核能簡訊》中的一篇報導，標題是：「我們真需要核能發電，來對抗全球暖化嗎？」答案是：「為了避免排放溫室氣體，而變成地球溫度上升的危險，在未來的 40 年內，我們必須減少 80% 的碳排放。但卻得面臨未來全球，將增加 2-3 倍的能源需求。只有生產大量的（零碳排放）能源，才能因應台灣能源需求的上漲。就目前我們所知道的能源來看，能辦到的只有核能。」

又稱：「台灣不能放棄任何能源的選項，需要找到最適合的能源組合。同時，也強調：「在減碳條件下，又要逐步達成『非核家園』的目標；任何決定都需要非常謹慎。」

準此，我要在此大喊：核四一定強！一定強！儘管反對者歧視它，必欲除之而後快，我敢作此論斷，所本的是自己長期從事工廠建設、安裝、試車、操作，所積累的經驗，對核能發電的長期瞭解，知道台電公司、原能會、經濟部等公家單位，傾全力監督，以及國家領導人也曾一再放下身段，參與溝通、輔導。有史以來，很少有別的重大公共建設，受到如此程度的重視。似此傾舉國之力，來督導、栽培、所陶鑄出來的錚錚鐵漢，是絕對經得起考驗的。

國人眼巴巴的想看到這座後起之秀的「老四」早點露面，只因抗爭人士太強勢，為顧全大局，政府只得勉強將它予以暫時封存，乃是為了下一代，保留一個選擇權，這也是一個痛苦的決定。請反對人士體諒這份苦心，為蒼生積一點陰德。

我把當年那次夜訪鹽寮的經過細節講完了，對停建核四，倉促運走燃料棒的荒謬行為，率直地表達了，你都知道了嗎？喔，對了！此刻的你是躺在加護病房吧？唉！30 年來若不是被這樣窮追猛打，此刻，你是多麼風光地在運轉了。好讓人惋惜，意識形態竟主宰一切！事到如今，也只有寄望以翻身來挽回了。

老四，你要挺住！好讓我這行將 95 歲的老兵，以歡欣鼓舞的心連趴帶滾地也要再來一次不一樣的「夜探田寮訪核四」，阿彌陀佛！

（本文作者為中技社工程師退休，曾獲 82 年聯合報環保文學獎）


淡化海水需要大量電力，因此電力來源是否採用清潔能源，對環境的影響至關重大。

解人類的渴 淡化海水的核能技術

文 編輯室

已有許多科學研究顯示，未來全球共同面對的最重大困境將是水資源匱乏，人類對水的需求越來越多，近 150 年內全球人均可飲用水量減少了 4 倍。目前全球 80 個國家中有 20 億人依靠有限的飲用水生活，地下水正快速消耗。地表淡水資源分布不均匀，全球可利用水資源的 20% 都位於西伯利亞的貝加爾湖。針對這種情況，人們提出了多種解決途徑，其中之一就是對海水或地表其他鹽水進行淡化處理，海水淡化已經是一個穩定且快速發展的工業。

海水淡化技術於 1950 年代開始發展，目前全世界最大的海水淡化廠在沙烏地阿拉伯，由於海水淡化廠非常耗電，因此利用核能將海水淡化是一種成本低廉又無污染的選擇，採用核能比化石能源對環境更有好處，例如不會產生二氧化碳的排放、

灰塵和爐渣等。因此許多國家致力於提升核能在海水淡化領域應用的經濟性和競爭力，許多小型反應爐如南韓的 SMART 都是用來進行海水淡化。

人類逐漸意識到，永續發展不是只有能源供應而已，水資源與氫能源的拓展更形重要，核能可大幅提高熱能轉換效率，取代燃煤電廠，將其產能應用在海水淡化、生產氫氣，且產生的熱能可供應給需要高溫應用的工業，及民生所需的暖氣需求。

20 多年來，國際原子能總署（IAEA）一再強調，人們應充分利用核能技術進行海水淡化，目前已經得到許多會員國的行動支持。現在全世界特別是在日本、印度和哈薩克，已擁有超過 200 個反應爐年的運轉經驗，核能淡化海水已被證明是非常重要的選項，可用以滿足人類日益增長的飲用水需求，並為許多短急流水區提供希望，解決許多乾旱與半乾旱地區飲用水短缺的困境。

為了支持成員國評估核能淡化海水的可行性，國際原子能總署開發「海水淡化經濟評估程式（Desalination Economic Evaluation Program, DEEP）」，加強海水淡化廠的成本評估分析；以及「海水淡化熱力學優化程式（DEsalination Thermodynamic Optimization Program, DE-TOP）」，可應用在熱力學的分析與核電綜合發電系統 (與海水淡化以及區域供熱有關) 的優化。國際原子能總署還發表了多篇技術報告，以突顯關於最佳耦合的技術資訊，包括安全考慮因



圖1. 核三廠的海水淡化廠可製造純淨的工業與民生用水(台電公司提供)

核三廠重要設備

■ 核能機組： 95.1 萬瓩 2 部機

建廠日程	開工	商業運轉
一號機	67.01.16	73.07.27
二號機	67.07.16	74.05.18

■ 氣渦輪機組： 5.1 萬瓩 2 部機
■ 風力機組 ： 0.15 萬瓩 3 部機
■ 太陽光電 ： 0.15 萬瓩
■ 海水淡化廠： 1,100 噸/日 2 部機

台灣電力公司 25 第三核能發電廠

圖2. 核三廠2部機組每天可分別生產約1,100噸乾淨淡水(資料來源:台電公司)

素、核能淡化海水的環境影響評估，以及利用核能進行海水淡化的潛在新技術。

使用核能做為熱源或電源進行海水淡化，有以下非常明顯的優點：

1. 沒有技術風險或困難，因為已經有大量成熟案例佐證。
2. 因為核能供應的電力或熱能價格低廉、品質穩定，實在是最好的海水淡化能源供應者。
3. 第四代核反應爐原本就以多功能、彈性化應用為設計理念，配合淡化設備，並不需要大幅修改設備，可以節省成本。
4. 根據分析，一座100萬瓩的標準核電廠，除了可生產電力之外，還可額外提供約2,000百萬瓦熱單位（MWt）的熱能，即便只使用其中1,000 MWt，每天都可以產生70萬噸淡水，足可供應300萬人使用。不但可以滿足我們的「渴望」，更可以減少很多溫水的排放，減少環境衝擊，實為一舉兩得的聰明抉擇。

核電廠使用海水作為冷卻水，不僅不會與民生搶水，還可將海水轉化為淡水，供給民眾使用。由此可見，核能發電廠不僅可以供電、供暖，還可以供應乾淨的民生用水。

世界各國都在興建海水淡化廠

美國最大的海水淡化廠在聖地牙哥，2016年興建完成後，每天能供應5,000萬加侖的水，規模也是西半球最大。加州

魔鬼谷（Diablo Canyon）核電廠內設有一座海水淡化廠，平均可以每天生產 67.5 萬加侖的淡水，除了供應電廠運轉所需的淡水之外，也是電廠員工的飲用水來源。由於加州面臨連續長達 4 年的乾旱之苦，於是希望能夠利用魔鬼谷的海水淡化設備來解決。

「別關閉核電廠！」這是前美國核能學會 (ANS) 理事長奎恩（Edward Quinn）的呼籲，由於加州缺水的情況非常嚴重，聖地牙哥市北方 35 英哩處的卡爾斯巴德（Carlsbad）也有座海水淡化廠，另外有 15 座海水淡化廠也在規劃中。不過自從 2012 年聖歐諾菲（San Onofre）核電廠宣布關閉之後，這些海水淡化廠所需的電力供應，只有依賴天然氣發電廠來提供。奎恩以阿拉伯聯合大公國 (UAE) 為例，UAE 擁有石油，卻堅持要建設核電廠，用來供應海水淡化廠所需的電力，這是正確、永續的選擇，為什麼加州無法作到？

位于哈薩克阿科陶（Aktau）的 MAEK 海水淡化廠於 20 世紀 70 年代投入運轉，1999 年關閉，產能為每天 12 萬噸，該廠配合了 3 座大型供熱廠和一座核電廠，為周邊城市供水，也為一些工廠提供工業蒸餾水。在俄羅斯羅斯托夫核電廠，有 4 座海水淡化廠運轉，並且還有 4 座在建，每座工廠每天生產淡水 50 噸。日本目前主要的 3 種海水淡化技術都有研發計畫，第一座創建於 1978 年。印度也建有一座混合了多級閃蒸技術（MSF）和逆滲透技術（RO）的小型工廠，2002 年開始運轉。鑑於這些工廠已取得的經驗，以及在核電廠設計中考慮整合一座淡化設施，俄羅斯國家原子能公司（Rosatom）的核電綜合系統規劃也包括海水淡化。這個綜合系統將包括一座大型 VVER 反應爐（3,200MWt），採用多效蒸餾技術（MED），產能將可達到 17 萬噸 / 天。

2017 年 3 月 29 日約旦和沙烏地阿拉伯





圖 3.4. 吃過海水淡化的冰棒嗎？位於核三廠附近的台電南部展示館除了販賣現磨咖啡外，更販售經由核三廠海水淡化設施處理過後的海水，製成多種口味的枝仔冰棒，由於海水在淡化後沒有雜質，製成紅豆、花生、芋頭、綠豆、巧克力和百香果等口味的枝仔冰棒別具風味。(南部展示館提供)

簽署了 15 項經貿協定，其中包含鈾礦探勘合作協議，並將在約旦建造兩部小型模組化反應爐 (SMR) 進行可行性研究，用於發電及海水淡化。早在 2014 年兩國即簽署關於核電廠及原料鈾開發、放射性廢棄物管理等合作計畫。沙烏地阿拉伯的核能計畫雖然剛起步，但計畫在 20 年內興建 16 部反應爐，重點也是在於產水，而產電供民生之用反倒其次。核能海水淡化的產量與清潔度，遠高於使用阿拉伯自產的石油與油氣，其成本則遠低於石油和油氣。

核電廠海水淡化後產出的淡水是可生飲等級的蒸餾水或逆滲透水，比起透過都市老舊管線、在家中水龍頭流出的自來水還要潔淨，品質甚至高過自來水廠剛出廠的淨水。

我國淡水資源匱乏

預計到 2050 年時，全世界將有 1/3 人口沒有潔淨的飲用水。台灣地區的年降雨量約 2,500 公厘，雖然是世界平均值的 3 倍，但是雨量過度集中於 5 至 10 月，只靠颱風與梅雨的幫忙 (約占 80%)，枯水期長達 6 個月。由於人口稠密、地形限制，台灣的每人平均分配到的降雨量卻只有世界的 1/6。此外，台灣河川短而陡，存蓄力差，需要以水庫積蓄水源、調節供需，所以我國水資源問題遠比其他國家嚴重。

台灣現有水庫約 40 座，總有效蓄水量約 20 億噸，而每年總用水量約為 180 億噸，除自河川引水 80 億噸及抽用地下水 60 億噸外，每年尚需由水庫供應 40 億噸，但是我們實在沒有再增設大型水庫的本錢。目前看來，除了節約用水外，海水淡化是解決用水難題、補充匱乏水資源的重要方案。核能可以提供低廉、安全、無碳排放的大量熱能與電能，可說是發展海水淡化最主要資源。

可能很多人不知道，我國也有核能海水淡化廠。台電公司為穩定供應核三廠電廠用水，於民國 78 年投資 2.06 億元興建一座日產 2,271 噸蒸汽壓縮式海水淡化廠 (兩部機組合計) ，供應核三廠冷卻用水與小部分民生用水。核三廠用淡化後的純水製成冰棒，銷路非常好，已然成為台電南部展示館的招牌。而北台灣第一座海水淡化廠則位在核四龍門電廠內，未來核四廠若能順利啟封商轉，不僅可以供應北台灣的電，也能解我們的渴。

參考資料：
1. Nuclear desalination, IAEA
https://www.iaea.org/topics/non-electric-applications/nuclear-desalination
2. 核能海水淡化的新進展，何偉部落格
http://blog.udn.com/H101094880/25690736
3. 核能海水淡化技術，中華民國核能學會
http://archived.chns.org/s.php@id=47&id2=201.html
4. 台電核能月刊 391 期 / 2015 年 7 月號
5. 國內現有海水淡化廠，經濟部水利署永續公共工程專屬網站
http://eem.wra.gov.tw/ct.asp?xItem=22834&CtNode=5344&#5344

瑞士最終處置場選址研究進入最終階段

譯 **編輯室**

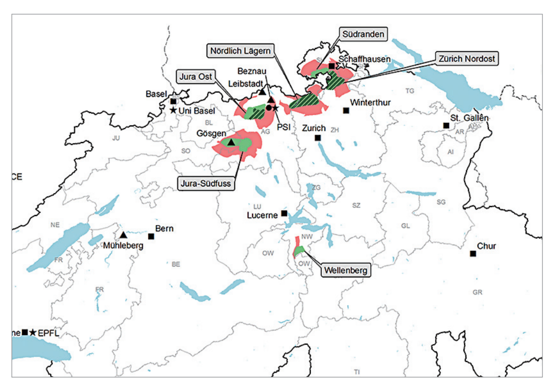
瑞士在 2011 年 11 月時就結束了兩座最終處置場（中低放射性廢棄物與高放射性廢棄物各一）選址的第一階段工作，並提出了 6 個潛在地區；隨後開始的第二階段，目標是替兩座處置場至少個別選出兩處潛在場址。至於即將開始的第三階段，瑞士國家放射性廢棄物處置公司（Nagra）在 2015 年初的時候就已表示，將在 Zürich Nordost 與 Jura Ost 兩個地區進行更進一步的調查，而在第二階段一同接受調查的其他 4 個地區 Südranden、Nördlich Lägern、Jura-Südfuss 與 Wellenberg，則將作為備選場址。

不過，在第二階段選址工作完成後，瑞士聯邦核子安全監察局（ENSI）在 2018 年 11 月時宣布將把備選廠址之一的 Nördlich Lägern 列入進一步調查的名單，而其他 3 個地區仍維持備選場址身份。

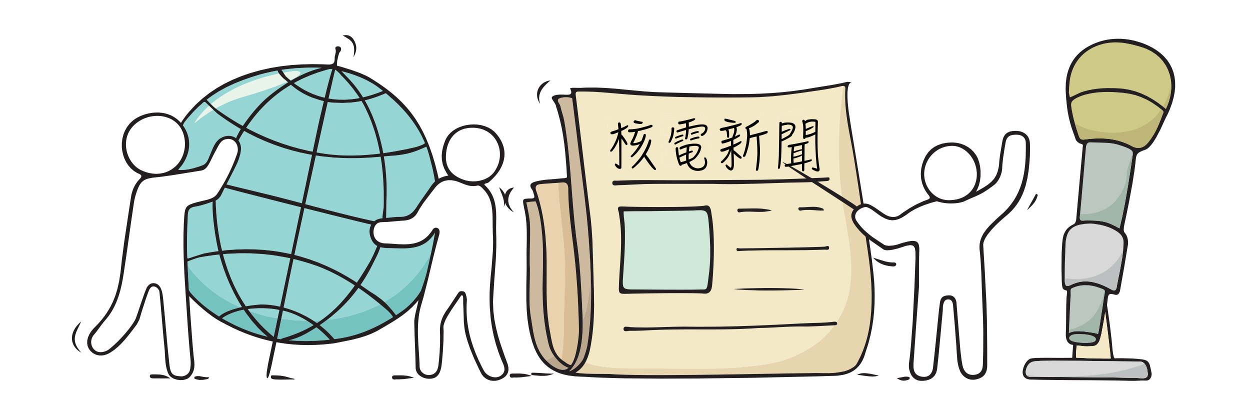
瑞士 Nagra 執行長恩斯特（Thomas Ernst）對此結果表示歡迎，也說到「Nagra 已準備好開始第三階段的工作，我們將於 2019 年 1 月開始一系列的深層鑽孔調查，這些調查將使我們能更了解備選場址地質環境的整體情況」。

恩斯特也表示，基於對地下環境現有的了解與安全相關的考量，Nagra 預計可在 3-4 年內宣布最適當的場址地區，並於 2024 年提交處置設施的一般許可申請，管制機構預計將在 2030 年做出是否准許的決定，且可以選擇是否進行全民公投。中低放射性廢棄物最終處置場預計將於 2050 年開始營運，高放射性廢棄物的預計將比其晚約 10 年。

資料來源：
World Nuclear News. (2018, November 23). “Swiss repository site search moves to final stage.”



瑞士在兩座最終處置場的第一階段選址選出 6 個潛在地區，並於第二階段縮減至 3 個。（圖片來源：IAEA）



國外新聞

英國重啓最終處置場選址程序

英國商業、能源與工業策略部（BEIS）於 2018 年 12 月中公開《實踐地質處置計畫：與當地社區合作：高放射性廢棄物長期管理更新架構》的政策文件，這是英國在 2013 年後，首次重啟最終處置場選址有關程序。BEIS 在聲明書中提到，該份文件闡述政府推動地質處置計畫來管理高放射性廢棄物，及如何與社區合作尋找最終處置設施的設置位置等議題的政策框架。

深層地質處置，即將放射性廢棄物放置在合適的岩層內進行最終處置，利用岩層可當作天然屏障的特性將廢棄物與地表上的影響（如氣候變遷等）隔離，目前英國並沒有任何最終處置設施。BEIS 表示，地質處置雖是一項耗資數十億英鎊的基礎建設投資，將會為設置地區長時間（超過 100 年）提供技術性的工作與福利，也是對後代子孫負責任的一項設施，對國家工業政策也可做出貢獻，使核能產業能提高生產力，也能推動放射性廢棄物的清理。

目前英國政府尚未決定任何首選地點，未來將採用一項以國家共識為基礎的選址程序來找尋合適的場址，並同時考量該地區的地質是否也適合。未來地質處置設施的選址將由英國核子除役機構（NDA）所屬的放射性廢棄物管理公司（RWM）負責，各個地方政府也將在決策過程中發揮關鍵角色，也將對公眾是否支持建造地質處置設施進行調查。

英國曾有坎布里亞郡（Cumbria）的兩個地區 Copeland 與 Allerdale 表態有興趣在當地建立地質處置場，但因地方議會投票反對進入下一階段的過程，選址程序於 2013 年終止。

World Nuclear News, 12/20/2018

瑞典管制機構支持最終處置場擴建

瑞典國家輻射安全局（SSM）於近期向瑞典土地環境法院提出建議，根據瑞典《環境法》，瑞典政府應准許擴建現有的中低放射性廢棄物最終處置場申請。該座

位於瑞典西部福斯馬克（Forsmark）、波羅的海底下 50 公尺深的處置場，是由 4 座 160 公尺長的石窖與 1 座 50 公尺高的混凝土貯存窖所組成，兩條平行的通道連結至地面，於 1988 年開始運轉，容量為 63,000 立方公尺。目前存放在該座最終處置場中壽命較短的廢棄物大部分都來自瑞典的核能發電廠，其他則是來自瑞典醫院、獸醫、研究與工業所產生的低放射性廢棄物。

營運廠商瑞典核燃料與廢棄物管理公司（SKB）於 2014 年底時提交擴建 3 倍的申請，期望能達到約 20 萬立方公尺的容量，目前這份申請正由瑞典輻射安全局與土地環境法院審查中。輻射安全局在最近發布聲明，基於環境法規，SKB 公司應獲得擴建的許可。輻射安全局認為 SKB 公司在選擇廢棄物貯存方法與位置時就已考慮到環境法規的要求，他們也證明了處置場的安全性，以及公司本身具備遵守環境法規的能力。

有關處置場擴建的聽證會將在今（2019）年晚些時候舉辦，之後瑞典土地環境法院將根據《環境法》向瑞典政府提交是否批准擴建的評估，輻射安全局則會根據《核子活動法》向政府遞交另外一份評估，最終將由瑞典政府來決定是否批准該座處置場的擴建。

World Nuclear News, 01/19/2019

法國延後核電廠關閉期限

法國總統馬克宏（Emmanuel Macron）最近發表了法國最新國家能源計畫，宣布法國將在 2022 年前關閉所有燃煤發電廠，並在 2035 年前關閉 14 部核反應爐，將核能發電的比例從超過 70% 降至 50%。而正當馬克宏發表這項聲明的同時，法國民眾正在為國家欲調漲燃料稅而進行示威抗議。

這項能源計畫主旨在為確保 2019-2023 年以及 2024-2028 年的能源政策可達到 2015 年通過的《能源轉型法（LTE）》的目標，但馬克宏決定將原訂 2025 年降低核能發電占比至 50% 的目標往後推遲了 10 年。對此馬克宏強調，他所主張的是「減少」核電比重，不是放棄核電。

到 2035 年將關閉的 14 部核電機組，其中只有最早關閉的 Fessenheim 核電廠 2 部機組會在馬克宏 5 年任期內退出運轉行列。馬克宏表示，在 2027-2028 年期間還會關閉 2 部機組，在「確保能源供應安全」和「若歐洲鄰國加速他們的能源轉型」的情況下，才有可能在 2025-2026 年間另外關閉 2 部機組，剩餘的 8-10 部機組預計關閉的時間則會從 2029 年開始，但不會有關閉整座核電廠的情況。

另外，馬克宏也提到，對發展再生能源的支持將從每年 50 億歐元增加到 70-80 億歐元（約 2,450-2,800 億新台幣），2030 年的陸上風力發電將增加 3 倍，太陽能發電增加 5 倍。另外，法國政府也宣布「2040 年將減少 40% 化石燃料使用」的目標，這將涉及到 2020 年關閉 4 座燃煤發電廠、2040 年結束排放溫室氣體車

輛的銷售，與 2028 年引進 480 萬台電動車等多項議題。

Nuclear Engineering International, 11/29/2018

日本因資金問題暫停英國核電廠建設計畫

日本日立製作所（Hitachi）在今（2019）年 1 月中宣布「以一個民間企業經濟合理性的角度來看，目前超出現狀的投資已達到極限」，決定將凍結其英國子公司於英國威爾法（Wylfa Newydd）與奧爾德伯里（Oldbury）2 座核電廠的建設工程。日立公司在 2012 年時收購成立於 2009 年的英國地平線核電公司（Horizon Nuclear Power），並推出威爾法與奧爾德伯里兩座核電廠各 540 萬瓩的核電廠建設計畫。

威爾法核電廠原預計於 2020 年代中期開始商轉，總工程耗資 260 億美元（約 7,800 億新台幣），預計可替當地帶來近 9,000 個工作機會。日立公司也強調，英國核電廠建設計畫雖然需要更多的時間來開發其財務結構，但日立也期望能繼續跟英國政府進行相關的協調。英國商業、能源與工業策略部（BEIS）大臣克拉克（Greg Clark）對此表示，英國政府仍認可核能發電的重要性，也認為英國需要為之後的融資作進一步的考量。

在日立公司宣布暫停威爾法核電廠計畫的 2 個月前，日本東芝公司（Toshiba）才因為在美國的核電分公司西屋電氣（Westinghouse Electric）宣布破產，加上未能替英國另一座於坎布里亞郡（Cumbria）西部新建的 Moorside 核電廠找到接手的買家，因此取消該座核電廠的興建計畫，並關閉子公司 NuGeneration。

World Nuclear News, 01/17/2019

波蘭預計在 2030 年後首次使用核能發電

波蘭能源部在最近發出聲明，如果國家核電計畫順利獲得政府批准，波蘭首座核電廠將於 2033 年開始運轉。波蘭在最近公布的《2040 能源政策草案》中公布未來國家電力配比，到 2040 年波蘭的核能發電總裝置容量將達到 100-150 萬瓩，波蘭能源部預計至 2043 年時波蘭的核電總裝置容量將可達到 600-900 萬瓩，占發電總量的 10% 左右。波蘭多年來一直在考慮興建核能發電設施，但政府尚未對該建設計畫做出任何有約束力的決定。

波蘭能源部部長 Krzysztof Tchorzewski 在新聞發布會中強調：「核電將可幫助我們加速降低碳排放」，也預計至 2030 年時可降低 30% 的碳排（與 1990 年相比）。在來自歐盟的壓力下，波蘭逐漸降低對燃煤發電的依賴，支持核能發電的聲浪也越來越高漲。能源部表示「核電將是因應減碳最簡單的方式」，未來也將把燃煤發電占比自目前的 80% 降至 60%，污染最嚴重的褐煤預計也將在 2040 年時消失殆盡，太陽能與風力發電的占比也會越來越高。

Reuters, 11/23/2018

核二廠 2 號機護箱裝載池可啓用置放用過核燃料

經過原能會查證，核二廠 2 號機護箱裝載池改為「用過核燃料貯存空間之設備修改案」施工與測試作業，確認台電公司已依承諾執行，其結果與設計要求一致，符合安全標準，已於 2019 年 1 月 11 日同意核二廠 2 號機裝載池燃料貯存格架可啟用置放用過核燃料。

原能會於 2017 年 4 月 6 日審查同意此申請案後，台電公司即進行 1 號機後續施工作業，經原能會視察後，於同年 5 月 19 日同意啟用。2 號機部分則另依規劃於 2018 年 7 月 10 日起執行施工作業，至同年 9 月 21 日完工。

綜合各項查證結果，原能會確認核二廠 2 號機護箱裝載池已依設計完成施工，符合安全要求，於 2019 年 1 月 11 日同意可啟用置放用過燃料。原能會表示，將持續就相關作業進行查證，確認電廠依規定執行。

本刊訊，2019/01/11

核一廠 1 號機停機靜待正式啓動除役作業

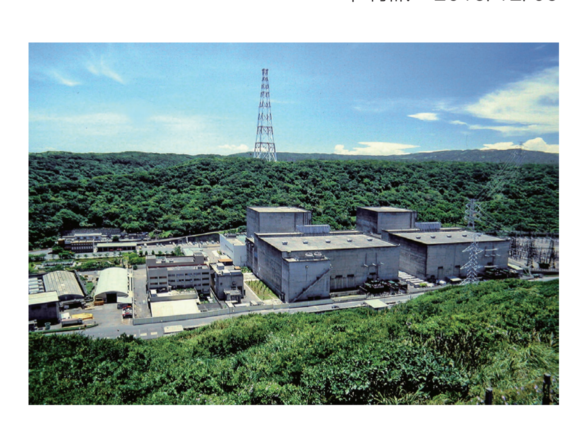
位於新北市石門區的台電核一廠 1 號機，其運轉執照於 2018 年 12 月 5 日到期，是台灣首座以核能發電運轉，也是第一座走入除役階段的核能機組。

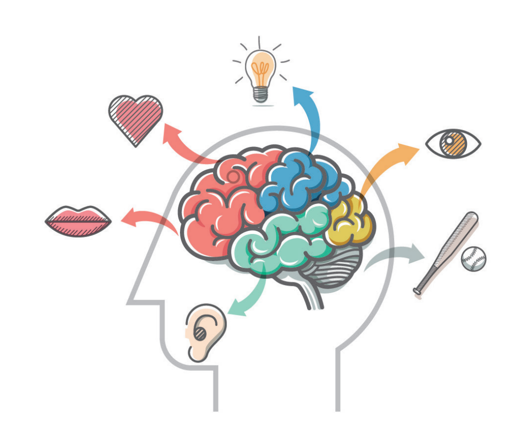
台電表示，核一廠 1 號機運轉執照 40 年有效期間屆滿，次日起就進入除役階段，機組依法正式停止運轉。核一廠除役計畫已於 2017 年 6 月 28 日通過原能會審查，待環保署環評審查通過，取得原能會除役許可後即正式展開除役作業。

核一廠 1 號機與 2 號機裝置容量皆為 63.6 萬瓩，分別於 1978 年 12 月與 1979 年 7 月商轉，運轉執照則分別於 2018 年 12 月 5 日及 2019 年 7 月 15 日屆期。核一廠 1 號機累積發電量約 1,625 億度，2 號機累積發電量約 1,754 億度，兩部機組累積發電量共達約 3,380 億度。

核一廠為我國十大建設之一，除了協助我國度過 1970 年代石油危機造成的經濟衝擊，長期而言，也改善台灣的投資環境，成為工業轉型的基礎，並加速中下游產業發展，促進台灣經濟發展及工業的全面升級。台電表示感謝新北市政府及石門鄉親提供寶貴用地及資源，共同帶領台灣經濟產業蓬勃發展。

本刊訊，2018/12/05



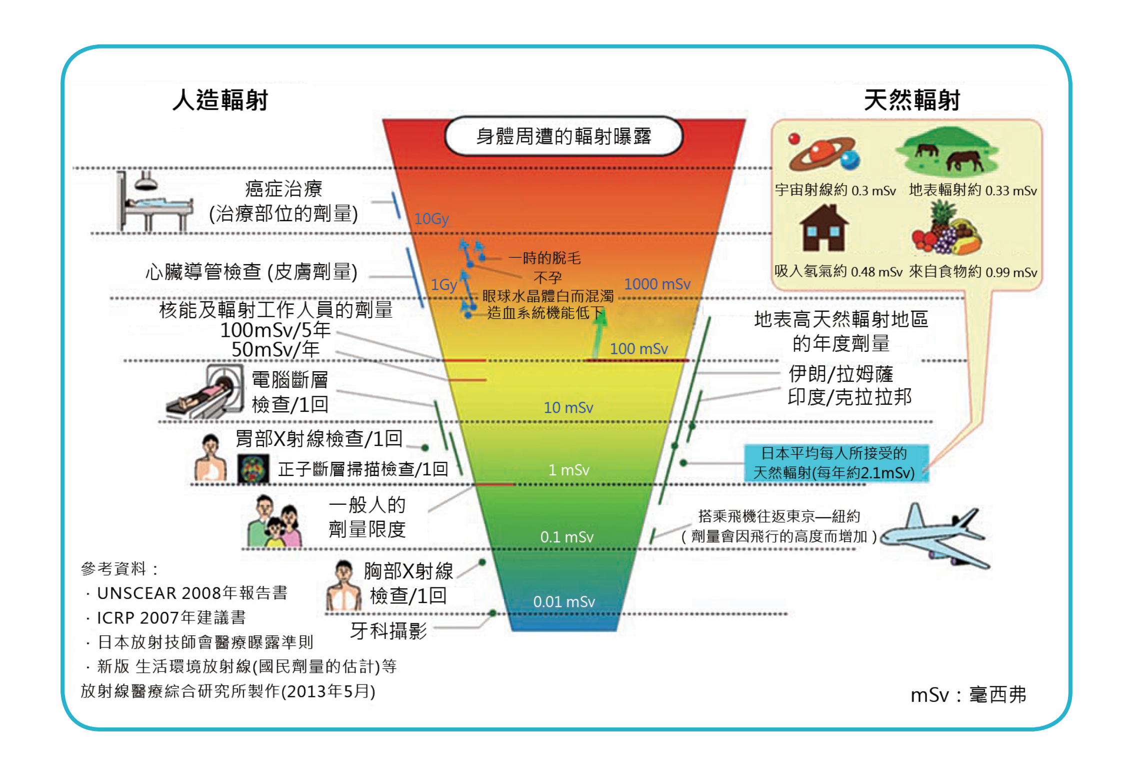


什麼是放射性與輻射？(十二)

譯 朱鐵吉

Q 在日常生活中有哪些輻射？劑量的高低如何？

A 我們在日常生活中所受到輻射曝露的量，除了特殊情形外，因放射治療所接受的劑量約在數毫西弗的程度，而已經確認人體在接受有效劑量 100 毫西弗以上時，才會對健康造成影響。



在我們體內、吃的食物中都有放射性物質？

A 鉀是生物中不可缺少的元素，大部分的食物都含有鉀。在所有的鉀當中只有 0.01% 的鉀屬於放射性鉀，在多數食物中也都很常見。由於放射性鉀會釋放貝他（β）與加馬（γ）射線，人體會透過攝取食物而造成體內曝露。但因為人體為維持體內鉀的濃度不變，來自食物中的鉀所造成的體內曝露劑量則是由個人體質決定，因此不會受到飲食生活所影響。

體內放射性物質



體重60公斤

鉀40	※1	4,000Bq
碳14	※2	2,500Bq
銣87	※1	500Bq
鉛、釙	※3	20Bq

※1 地球誕生時就存在的核種
※2 宇宙射線撞擊氮14而產生的核種
※3 地球誕生時就存在的鈾系列核種

食物中放射性物質(鉀40)的濃度



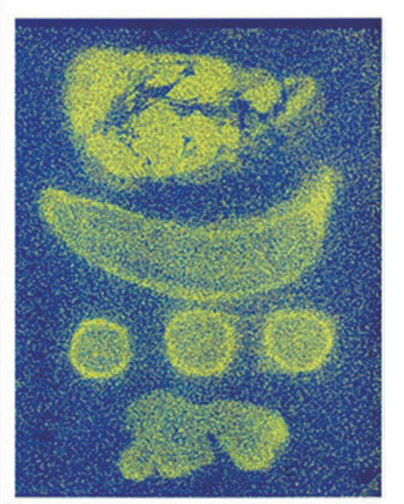
米 30　牛乳 50　牛肉 100　魚 100　奶粉 200　菠菜 200　炸洋芋片 400
茶 600　乾香菇 700　乾海帶 2,000 (Bq/kg)

Bq：貝克、Bq/kg：貝克/公斤

參考資料：日本原子力安全研究協會「生活環境放射線數據的研究」(1983年)

可以用眼睛看見輻射嗎？

A 食物中含有鉀 40 會釋放貝他與加馬射線，可利用影像板檢測鉀 40 貝他射線的分布。下頁圖是把豬肉、香蕉與生薑放置在影像板上 24 天並遮住來自外部輻射而獲得的影像，可看到豬肉的蛋白質、香蕉的皮、生薑的薑芽等部位含有較多量的鉀，而豬肉脂肪中含有的鉀則較少。



豬肉、香蕉 (縱切面及橫切面)、
生薑本身含有放射線分布的影像

食物中含有的輻射

- 主要是鉀40的β(貝他)射線
- 鉀40的同位素豐度※為0.012%
- 鉀40的半化期為1.26×10^9年

※自然存在的鉀之中鉀40的比例

文獻：森, 應用物理, 97, No.6, 2008年

註：天然豐度（Natural Abundance, 縮寫：NA），又稱天然存在比，是指在一個行星上，被發現天然存在的化學元素，其同位素的化學元素豐度。豐度的大小一般以百分數表示。

Q 因診斷疾病所接受到輻射曝露的劑量是多少？

A 因放射線檢查所接受到曝露的劑量會依檢查的種類而有不同，如牙科攝影僅著重在局部的檢查，接受到輻射曝露的劑量較少，也有像是 X 射線電腦斷層掃描（CT）與核子醫學檢查等輻射曝露的劑量較高的檢查。另外，即使使用同類型的檢查，劑量也會根據醫療機構的不同而有變化，建議使用「診斷參考水平」來判斷診斷所接受到的劑量是否過高。如果醫療機構的平均輻射劑量偏離診斷參考水平太多，國際放射防護委員會（ICRP）就會考慮對該機構的輻照條件（irradiation conditions）、進行修正。

在歐美等的國家中，有些都已開始採用診斷參考水平，日本診療放射

技師會則是在 2000 年發布了自己的《醫療曝露指南（降低目標值）》，以便獨立編制日本的診斷劑量參考水平，並在 2006 年修訂成《2006 年醫療曝露指南》。後來，醫療曝露研究資訊網（J-RIME）* 以參與團體的實際調查結果為基礎，首次確立日本的診斷參考水平。

註：醫療曝露研究資訊網站（Japan Network for Research and Information on Medical Exposures：J-RIME）從 2000 年開始，邀請很多專家，蒐集日本國內外有關醫療曝露的研究資訊，考察國內的醫療曝露情形，確立醫療曝露的防護體系。J-RIME 的活動目的對輻射診療的醫療曝露的風險評估等等有關的數據之蒐集，有效的掌握日本醫療曝露的實際狀況，並與國際醫療曝露的情勢密切聯繫。（參考資料：日本國立研究開發法人 量子科學技術研究開發機構 放射線醫學種核研究所 http://www.nirs.qst.go.jp/rd/structure/merp/j-rime.html）

檢查種類	診斷參考水平[*1] (吸收劑量)	實際曝露的劑量[*2]	
		劑量	劑量種類
一般攝影：胸部正面	0.3mGy	0.06mSv	有效劑量
乳房攝影 (平均乳腺劑量)	2.4mGy	2mGy程度	等價劑量 (乳腺劑量)
透視攝影	介入放射療法(IVR)：透視劑量率 20mGy/分	胃的透視 4.2-32mSv程度[*3] (因執行人員與受檢者而不同)	有效劑量
牙科攝影	由 下顎 前齒部1.1mGy 至 上顎 大臼齒部2.3mGy	2-10μSv程度	有效劑量
X射線斷層掃描(CT)檢查	成人頭部單純日常工作85mGy 小孩(6~10歲)頭部60mGy	5-30mSv程度	有效劑量
核醫學檢查	每次放射性藥品的值	0.5-15mSv程度	有效劑量
正子斷層掃描(PET)檢查	每次放射性藥品的值	2-20mSv程度	有效劑量

*1：醫療曝露研究資訊網站「最新日本國內實態調查結果為基礎擬定的參考水平」2015年6月7日 (2015年8月11日部分修正) (http://www.radher.jp/J-RIME/)
*2：日本量研機構「斷層掃描(CT)檢查等醫療曝露，解答有關醫療曝露風險的疑問以及防護的Q&A」(http://www.nirs.qst.go.jp/rd/faq/medical.html)
*3：日本北里大學醫學放射線部「醫療中的放射線基礎知識」(http://www.khp.kitasao-u.ac.jp/hoshasen/iryo/) 「健康診斷X射線檢查」的「胃透視」數據製作

補充說明：mGy：毫戈雷、mSv：毫西弗、μSv：微西弗、mSv：毫西弗= 1,000 微西弗

本單元資料來源：日本環境省《輻射對健康影響的基礎知識，第二章：輻射曝露》P.71-74，2016 年。


何博士的日常豆知識
Q：我們可以用風力發電取代核能嗎?
風咧
Bow-wow
開心
風有季節性
沒風就沒電
台灣的用電高峰在夏季，卻剛好是無風季節，
可見風力發電無法配合用電需求提供穩定電力。
此外，以核四每年193億度的發電量為例，
若想用風力發電取代，需要約3500座風機（可繞台灣一圈），
再加上風機設置地點附近居民的強烈抗爭，
抱怨噪音、眩光乃至影響風水問題，
因此未來要大量推廣風力發電，仍有相當的困難。
台灣的風力發電恐難取代核能發電


何博士的日常豆知識
Q：積極發展太陽能，
就可以不要核能嗎?
汝講啥？
日頭這麼大，看嘛
不行！
因為太陽能發電還有這些問題：
不穩定！
陽光夠強才能發電，沒太陽就沒電。
太佔地方！
太陽能板鋪滿整個台北市，
還達不到目前全國核電廠發電量。
太貴！
台灣太陽能發電成本，
是平均發電成本的2～3倍。
太陽能發電無法24小時穩定供電，成本又高，現階段仍無法取代核電